

Eeva-Kaisa Snellman

VESIJOHTOVERKOSTON TIEDONSIIR- TOPROTOKOLLAN VALINTA

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastajat: Mikko Salmenperä ja Annina Takala
Tammikuu 2023

TIIVISTELMÄ

Eeva-Kaisa Snellman: Vesijohtoverkoston tiedonsiirtoprotokollan valinta
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Ympäristö- ja energiatekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Tammikuu 2023

Vesilaitokset ovat havahtuneet ikääntyvien verkostojen kohtaamiin haasteisiin, joita ovat mm. putkivuodot ja -rikot. Älyvesisovellukset, kuten digitaalinen mittaaminen ja analytiikka, voivat olla osa ratkaisua näihin haasteisiin. Niiden avulla vuodot voidaan havaita aikaisemmin ja täten vähentää tuottamattoman veden määrää. Vesihuollon toimintaympäristö asettaa omat vaatimuksensa tiedonsiirtoverkolle. Tämän diplomityön tarkoitus on selvittää älyvesiverkoston tiedonsiirtoprotokollan valintaprosessin vaiheet ja vaatimukset ja mitä valintaprosessissa tulee huomioida. Työssä keskitytään erityisesti vesihuollon toimintaympäristöön ja sen asettamiin vaatimuksiin.

Tutkimus toteutetaan kirjallisuusselvityksenä, jossa kerätään tutkimustuloksia aikaisemmista tiedonsiirtoprotokollia vertailevista tutkimuksista. Ensin selvitetään suomalaisen vesihuollon toimintaympäristö, johon älyvesimittarit ja tiedonsiirtoprotokolla tuodaan. Tutustutaan myös älykaupungin ja älyveden käsitteisiin ja IoT:n ja ICT:n rooliin vesihuollon digitalisaatiossa. Sen jälkeen tarkastellaan tiedonsiirtoprotokollien yleisiä ominaisuuksia ja niiden sovelluksia. Myöhemmin syvennytään yksittäisten protokollien erityispiirteisiin. Tiedonsiirtoprotokollat, joita tässä työssä tutkitaan tarkemmin, ovat LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, Ingenu RPMA, DASH7, Weightless-P, Symphony Link ja Wireless M-Bus.

Tutkimustuloksena on selvitys tiedonsiirtoprotokollan valintaan vaikuttavista kriteereistä ja parametreista. Tuloksissa osoitetaan erityisesti se, mitä vesihuollon vaatimukset tiedonsiirtoverkolle ovat. Osana tulosten tulkintaa ovat protokollavaihtoehtojen vertailu sekä tulosten pohjalta esitetyn päätöksentekoprosessin kuvaus. Protokollien välillä havaittiin sekä yhtäläisyyksiä että eroavaisuuksia. Tutkimuksen aikana esille nousseita valintaprosessiin vaikuttavia tekijöitä puolestaan ovat energiatehokkuus, kantama, rakenteellinen skaalautuvuus, laitteiden edullisuus, luotettavuus ja suorituskyky niin UL- kuin DL-suuntaan.

Tutkimuksen aikana ilmeni, että tiedonsiirtoprotokollan valintaprosessi vaihtelee tapauskohtaisesti, eikä ole olemassa yhtä kaikkiin tilanteisiin sopivaa tiedonsiirtoprotokollaa. Tiedonsiirtoprotokollaa valittaessa tehdään useita pienempiä valintoja. On valittava lisenssivapaa ja lisensoidun kaistan välillä. Tätä seuraa tarkempi taajuuskaistan valinta valitulta alueelta eli määritellään verkon operointitaajuus ja kaistanleveys. Sitten valittavana on modulaatiotekniikka ja kanavan käyttömetodi. On myös valittava, onko tiedonsiirto yksi- vai kaksisuuntaista. Päätettävänä on myös, annetaanko infrastruktuurin käyttöönotto ja ylläpito palveluntarjoajan vastuulle vai halutaanko mahdollisuus rakentaa oma tiedonsiirtoverkko.

Avainsanat: älyvesi, älykäs vesijohtoverkosto, tiedonsiirtoprotokolla, älykäs mittaus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Eeva-Kaisa Snellman: Process of choosing a data transfer protocol for smart water grid
Master of Science Thesis
Tampere University
Master's Degree Program in Environmental and Energy Engineering
January 2023

Water works have become aware of the fact that aging networks are facing challenges such as pipe leaks and -bursts. Smart water application, such as digital metering and analytics could be a part of a solution for these challenges. With them leaks could be detected earlier and thus decrease the amount of unprofitable water. Operating environment of the water supply sets its own demands for the data transfer network. The objective of this master's thesis is to determine the phases of process of choosing a data transfer protocol for smart water grid and demands and what should be noted in the choosing process. In this thesis the focus is especially on the operating environment of the water supply and its demands.

The research is implemented as a literature survey in which results from previous research, that compare data transfer protocols, are collected. First, the Finnish operating environment of the water supply, into which smart water meters and data transfer protocol are brought, is clarified.

Also, the concepts of smart city and smart water and the role of IoT and ICT in digitalization of water works are explored. After that the general features of data transfer protocols and their applications are reviewed. Later, the research goes deep into the specifics of protocols. Data transfer protocols that are studied in this thesis are LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, Ingenu RPMA, DASH7, Weightless-P, Symphony Link and Wireless M-Bus.

As a research result is a report on criteria and parameters impacting the choosing of a data transfer protocol. The results indicate particularly what are water works' requirements for the communication network. As a part of the interpretation of results are comparison of data transfer protocols and description of decision-making process. Both resemblances and differences between the protocols are discovered. Factors affecting the selection process that emerged during the research, in turn, are energy efficiency, range, structural scalability, inexpensiveness of devices, reliability and both UL and DL performance.

During the research occurred that the process of choosing a data transfer protocol varies from case to case and there is no one data transfer protocol that is suitable for all occasions. When choosing a data transfer protocol several smaller choices are made. The choice between license-free and licensed band. This is followed by a more detailed selection of frequency band from the chosen band which means that network operation frequency and bandwidth must be defined. Then the modulation technology and channel access method must be chosen. It is also necessary to choose whether data transfer is one-way or two-way. It is also necessary to decide is the deployment and maintenance of infrastructure given on the responsibility of the service provider or do you want to be able to build your own data transfer network.

Keywords: smart water, smart water supply network, data transfer protocol, smart metering

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty toukokuun 2022 ja tammikuun 2023 välisenä aikana. Työn aiheen on antanut Sastamalan Vesi. Työn ohjaajina ovat toimineet yliopisto-opettajat Mikko Salmenperä ja Annina Takala Tampereen yliopistolta.

Haluan osoittaa kiitokset Sastamalan Vedelle mielenkiintoisesta aiheesta. Kiitän koko vesihuoltolaitoksen henkilökuntaa yhteistyöstä ja avusta työhön liittyen. Mikko Salmenperää ja Annina Takalaa haluan kiittää työn tarkastamisesta, ohjauksesta, rakentavasta palautteesta ja arvokkaista neuvoista työn kirjoittamisen aikana. Kiitos myös Veli-Pekka Pyrhöselle, joka oli mukana prosessin alkuvaiheessa.

Lämpimät kiitokset kotijoukoille kaikesta siitä tuesta ja kannustuksesta, jota olen heiltä saanut opintojeni aikana. Haluan kiittää erityisesti avopuolisoani ymmärryksestä ja kärsivällisyydestä kirjoitusprosessin aikana. Kiitokset myös opiskelutovereille unohtumattomista opiskeluvuosista.

Jyväskylässä, 6.1.2023

Eeva-Kaisa Snellman

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. ÄLYVESI.....	3
2.1 Älykaupunki ja älyvesi	3
2.2 Vesihuolto Suomessa	3
2.2.1 Vuotovedet.....	5
2.3 Vesihuoltolaitosten digitalisaatio.....	6
2.4 Älyvesisovellusten mahdollisuudet ja haasteet.....	8
2.5 IoT ja ICT älykkään vesihuollon osana	9
3. TIEDONSIIRTOPROTOKOLLAT	12
3.1 Tiedonsiirtoprotokollien yleinen rakenne ja sovelluksia	12
3.2 Tiedonsiirtoprotokolla vesihuollon toimintaympäristössä	14
3.3 Vaihtoehtoiset tiedonsiirtoprotokollat.....	16
3.3.1 LoRaWAN.....	16
3.3.2 Sigfox.....	18
3.3.3 NB-IoT	19
3.3.4 Ingenu RPMA	19
3.3.5 DASH7.....	21
3.3.6 Weightless-P.....	21
3.3.7 Symphony Link	22
3.3.8 M-Bus ja Wireless M-Bus.....	23
3.4 Esimerkkejä älyvesimittareiden tiedonsiirtoprotokollista	25
4. AINEISTO JA MENETELMÄT	26
4.1 Tutkimuksen eteneminen	26
4.2 Sastamalan Vesi liikelaitos.....	28
5. TIEDONSIIRTOPROTOKOLLAT ÄLYVESIVERKOSTOISSA	30
5.1 Valintaan vaikuttavat vaatimukset ja parametrit.....	30
5.1.1 Vesihuollon vaatimukset tiedonsiirtoverkolle	30
5.1.2 Muita parametreja	32
5.2 Protokollavaihtoehtojen vertailu	35
5.3 Päätöksentekoprosessi	41
6. JOHTOPÄÄTÖKSET	44
LÄHTEET	46

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AES	Mukautuva salausstandardi (Advanced Encryption Standard)
AMR	Automaattinen mittarinluenta (Automated meter reading)
CDMA	Code Division Multiple Access
CSS	Chirp Spread Spectrum
DBPSK	Differential Binary Phase Shift Keying
DL	Tukiasemalta päätelaitteelle -tiedonsiirtosuunta (Downlink)
DSSS	Suorasekventointi (Direct Sequence Spread Spectrum)
D7AP	DASH7 Alliance Protocol
ETSI	Euroopan telealan standardointilaitos (European Telecommunications Standards Institute)
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GSM	Global System for Mobile Communications
ICS	Älykäs ohjausjärjestelmä (Intelligent control system)
ICT	Tieto- ja viestintäteknikka (Information and communications technology)
IoT	Esineiden internet (Internet of Things)
ISM	Industrial Scientific Medical
IWA	International Water Association
LoRa	Long Range
LoRaWAN	Pitkän kantaman laajaverkko (Long Range Wide Area Network)
LPWAN	Pienitehoinen laajaverkko (Low Power Wide Area Network)
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
NB-IoT	Kapeakaistainen esineiden internet (Narrow Band IoT)
PSK	Phase Shift Keying
RPMA	Random Phase Multiple Access
SW	Älyvesi (Smart Water)
Topologia	Verkonosien looginen kytkettyminen toisiinsa
UL	Päätelaitteelta tukiasemalle -tiedonsiirtosuunta (Uplink)
UNB	Ultra Narrow Band
WSAN	Wireless sensor and actuator network

1. JOHDANTO

Nykyiset vesijohtoverkostot ovat ikääntymässä ja heikentymässä. Ikääntyvien verkostojen kohtaamia haasteita ovat mm. putkivuodot ja -rikot. Vesiverkostojen suuren laajuuden ja siihen yhdistettyjen laitteiden vaikean saavutettavuuden takia vesilaitoksilla ei aina ole todenmukaista tietoa tilanteestaan tai niissä ei olla tietoisia vuotojen ilmenemisestä vedenjakelujärjestelmässään. (Lalle et al. 2021) Vesilaitokset ovat havahtuneet siihen, kuinka älyvesisovellukset, kuten digitaalinen mittaaminen ja analytiikka, voisivat olla osa ratkaisua vesi-infrastruktuurin haasteisiin. Nämä sovellukset voisivat mm. edistää laitoksen tehokkuutta ja vähentää tuottamattoman hukkaveden syntymistä. Älykkään mittaamisen hyödyllisyys onkin kenties helpointa laskea ja ymmärtää taloudellisesta näkökulmasta. Beal & Flynn (2015) esittelevät artikkelissaan kyselyn, jonka mukaan kolme merkittävintä älykkäästä vesiverkostosta saatavaa taloudellista hyötyä ovat tuottamattoman veden vähentäminen (vuodot ym.), kysynnän ennustaminen ja tieto huippukysynnästä sekä mukautuminen infrastruktuurin laajentamiseen.

Termillä älyvesi (eng. smart water) viitataan älykkääseen vesihuoltoon, jossa perinteiseen vesijohtoverkostoon on integroitu innovatiivisia teknologioita, kuten tieto- ja viestintäteknologiaa (eng. Information and communication technology, ICT) ja monitorointia. (Ramos et al. 2019) Viime aikoina markkinoille on ilmestynyt uudenlaista langatonta matalatehoista viestintäteknologiaa, jonka uskotaan vastaavan älykkäiden vesijohtoverkosto-sovellusten vaatimuksiin. Nämä kommunikaatioteknologiat selättävät paljon energiaa kuluttavien ja lyhyen kantaman teknologioiden haasteet tarjoten lisäksi erinomaisen radioläpäisyn. Lisäksi nämä matalatehoiset teknologiat ovat edullisempia verrattuna esimerkiksi matkapuhelinverkkoihin. (Lalle et al. 2021) Tässä diplomityössä tarkasteltavat protokollavaihtoehdot ovat LoRaWan, Sigfox, NB-IoT, Ingenu RPMA, DASH7, Weightless ja Symphony Link.

Tämän diplomityön tavoite on selvittää, mitä asioita vesihuollon näkökulmasta täytyy huomioida valittaessa tiedonsiirtoprotokollaa älykkäiden vesimittareiden tiedonsiirtoa varten. Kirjallisuuden pohjalta on tarkoitus muodostaa ehdotus tiedonsiirtoverkon valintaprosessista. Työ toteutetaan kokonaan kirjallisuusselvityksenä, jossa tutkitaan ja selvitetään aiempia tutkimuksia ja suosituksia tiedonsiirtoprotokollan valinnasta. Diplomityön tutkimuskysymyksinä ovat:

- Millainen on älyvesiverkoston tiedonsiirtoprotokollan valintaprosessi?
- Mitä tulee huomioida valintaprosessissa?

Tällainen tiedonsiirtoteknologia on vielä suhteellisen uutta ja tämä tutkimus kokoakin tiedonsiirtoprotokolliin liittyvää tutkimusta maailmalta ja tuo nämä tutkimukset vesihuollon kontekstiin. Tämän työn tulokset auttavat kehittämään aikaisempiin tutkimustuloksiin pohjautuvaa lähestymistapaa tiedonsiirtoprotokollan valintaprosessiin ja huomioimaan tiedonsiirtoverkon rakentamiseen vaikuttavia tekijöitä vesihuollon näkökulmasta. Diplomityö ei ole tarkoitettu pelkästään vesihuollon toimijoille, vaan se toimii ohjenuorana muillakin aloilla, joilla tarvitaan vastaavanlaista tiedonsiirtoa.

Seuraavassa luvussa käsitellään tarkemmin älykkäitä vesijohtoverkostoja ja vesihuoltolaitosten digitalisaatiota. Samassa luvussa esitellään myös perinteinen vesi-infrastruktuuri, siis ympäristö, johon tiedonsiirtoteknologia ollaan tuomassa. Kolmas luku on katsaus erilaisiin tiedonsiirtoprotokolliin ja niiden ominaisuuksiin. Siinä käydään läpi niiden sovelluksia, yleistä rakennetta, vesihuollon asettamia vaatimuksia tiedonsiirrolle ja vaihtoehtoisia tiedonsiirtoprotokollia. Neljännessä luvussa käsitellään tutkimusaineistoa ja menetelmää. Se esittelee menetelmän valinnan, tutkimuksen etenemisen ja työn tilaajan, Sastamalan Vesi liikelaitoksen, tapausesimerkin. Viidennessä luvussa yhdistetään vesihuolto ja tiedonsiirto sekä käsitellään tutkimuksen tuloksia ja tulkitaan niitä. Luku käsittelee tarkemmin valintaan vaikuttavia vaatimuksia ja parametreja sekä protokollavaihtoehtojen vertailua ja päätöksentekoprosessia. Viimeinen eli kuudes luku sisältää johtopäätökset.

2. ÄLYVESI

Tässä luvussa esitellään älykaupungin ja älyveden käsitteet. Sen lisäksi kuvataan perinteisen vedenjakeluinfraktuurin rakennetta ja vesihuoltolaitosten digitalisaatiota. Luvussa sivutaan myös älyvesiratkaisujen mahdollisuuksia ja haasteita. Lopuksi luvussa analysoidaan esineiden internetin (eng. Internet of Things, IoT) ja ICT:n roolista älykkäässä vesihuollossa.

2.1 Älykaupunki ja älyvesi

Älykaupungin käsite ilmestyi joitain vuosia sitten ja sen voidaan yksinkertaisesti kuvailla olevan kokoelma erilaisia ajatuksia siitä, kuinka ICT voisi auttaa parantamaan kaupunkien toimivuutta. Vaikka älykaupungin käsite kasvattaa suosiotaan, ja yhä useampia kaupunkeja pidetään sellaisina, sen katsotaan olevan yhä kehitysvaiheessa. (Camero & Alba 2019) Älykaupunki on usein jaettu kuuteen alueeseen, jotka ovat talous, ympäristö, hallinto, asuminen, liikkuminen ja ihmiset. Näistä älykäs ympäristö käsittää mm. älykkäät sähköverkot, ympäristöystävällisen rakentamisen ja kaupunkisuunnittelun. Lisäksi tähän älykaupungin osa-alueeseen kuuluu älykäs vesihuolto. (Camero & Alba 2019) Älykkäiden ratkaisujen lisääntyminen mahdollistaa yhdyskuntateknisten järjestelmien ja palveluiden paremman hallinnan sekä uusien palveluinnovaatioiden kehittymisen (RIL 2021).

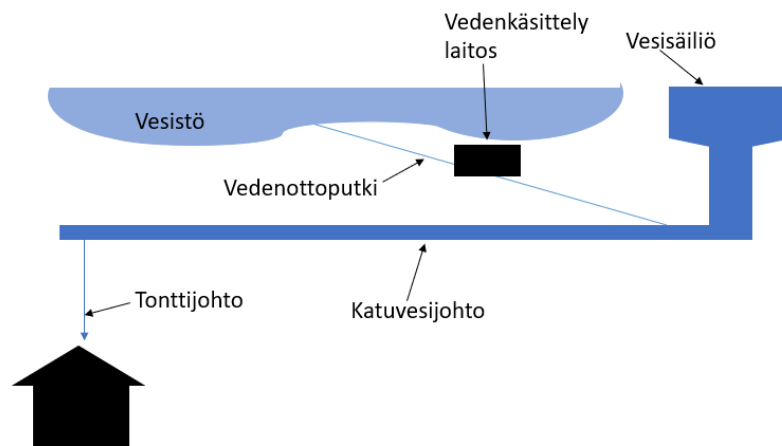
Älyvesi puolestaan on käsite, joka on liitetty uuden sukupolven älykkääseen vesihuoltoon (Lalle et al. 2021). Älyvesi-termillä viitataan uusiin järjestelmiin, jotka käyttävät viimeisimpiä tiedonsiirtovalmiuksia ja paranneltuja toiminnallisuuksia (Kulkarni & Farnham 2016). Älykäs vesihuolto on nykyisin toteutettu yhdistämällä innovatiivisia teknologioita, kuten ICT:tä ja monitorointia, perinteiseen vesijohtoverkoston (Ramos et al. 2019). Merkittävin asia, jonka älyvesi tuo mukanaan perinteiseen vesihuoltoon on nimenomaan informaatiokerros (Lalle et al. 2021). Älykkään vesihuollon päämääränä on hyödyntää vettä sekä alueellisella että kaupungin tasolla kestävästi ja omavaraisesti (Ramos et al. 2019).

2.2 Vesihuolto Suomessa

Vesihuoltopalvelu käsittää toiminnan, jossa juomakelpoinen vesi saatetaan kuluttajan käyttöön ja jätevesi puolestaan johdetaan jätevedenpuhdistamolle ja sieltä edelleen takaisin ympäristöön. Vesihuoltoverkostot muodostavat arviolta jopa 80 % vesihuoltolaitosten pääomasta. (Rajala 2021) Tästä syystä niiden kunnosta on tärkeää huolehtia.

Kuitenkin Suomessa on kaikkiaan yli 100 000 kilometriä vesijohtoverkostoa, josta 6000 kilometriä on arvioitu erittäin huonokuntoiseksi. Korjauksia tehdään tällä hetkellä vain noin 700–900 kilometriä vuodessa. (RIL 2017)

Vesilaitokseen kuuluvat ne rakenteet ja laitteet, joita tarvitaan veden ottoon vesistöstä tai pohjavesiesiintymästä, veden siirto vesilähteeltä yhdyskunnan alueella, veden käsittelyyn, varastointiin ja jakeluun. Vesilaitos alkaa siitä, missä vesi joutuu pois luonnonympäristöstä ja päättyy siihen, missä vesi luovutetaan käyttäjälle. Raja on yleensä vedetty asiakkaan tontin rajalle tai tonttijohdon ja runkoputken liittymäkohtaan. Joskus osa tonttijohdosta on vesilaitokselle kuuluvaa, kuten myös käyttäjän vesimittari. Vaikka vesilaitokseen ei lueta kuuluvaksi vedenkäyttäjien omistamia, rakennuksen sisäisiä johtoja tai laitteita, niiden asettamat vaatimukset, esimerkiksi jakeluverkoston painetasot, joudutaan huomioimaan vesilaitoksella suunnittelussa ja käytössä. (Karttunen & Tuhkanen 2003) Kuvassa 2 on esitetty yksinkertainen piirros vesilaitoksen perusrakenteesta.



Kuva 1. Vesilaitoksen perusosat, lähdettä Karttunen & Tuhkanen (2003) mukailien

Vedenjakelujärjestelmä puolestaan on yksinkertaistetusti ohjausjärjestelmä, jossa järjestelmän ohjain ohjaa venttiilejä, jotka säätelevät veden virtaamaa ja painetta kulutuksen vaatimusten mukaisesti. (Kulkarni & Farnham 2016)

Suomessa vesivarojen riittävyys ei ole ongelma paitsi alueellisesti ja kausittain. Suomessa hyvälaatuisen pohja- ja pintaveden riittävyys talousveden raaka-aineeksi aiheuttaa haasteita paikallisesti, vaikka valtakunnallisesti tarkasteltuna vettä otetaan vain murto-osa verrattuna korkealuokkaisten vesivarojen kokonaistilavuuteen. (Salminen 2017)

Suomessa kunnat vastaavat vesihuollosta. Käytännössä tämä tapahtuu kunnan vahvistamilla toiminta-alueilla. Toiminta-alueen ulkopuolella vastuu on sen sijaan kiinteistön

omistajalla tai osuuskunnalla, jolle on niin ikään määritelty oma toiminta-alueensa. Hulevedet eivät ole osa vesihuoltopalvelua. (Rajala 2021) Vesihuoltopalveluiden rahoitus tulee kuluttajilta kerättävistä maksuista.

Suomessa oman haasteensa vesijohtoverkostolle tuottavat kylmä ilmasto ja routiminen. Routa aiheuttaa putkille ylimääräistä kuormitusta ja lisää putkistovuotojen riskiä. Routaraja täytyy Suomessa huomioida vesiputkia asennettaessa. Putket täytyy syvemmälle, routarajan alapuolelle.

2.2.1 Vuotovedet

Vedenjakelujärjestelmässä ilmenee vuotoja jatkuvasti, joten järjestelmän tietyn ajanjakson kokonaisvuotomäärä on yhteenlaskettu summa jokaisen yksittäisen vuodon määrästä kerrottuna ajalla, jonka se ehtii vuotaa ennen korjaamista. Näin ollen tiheys, jolla kaikki järjestelmän osat voidaan testata vuotojen varalta vaikuttaa koettujen vuotojen määrään. Luonnollisesti on olemassa käytännön rajoituksia tälle testaustiheydelle, joten on väistämätöntä, että jonkin verran vuotoa esiintyy. On olemassa myös tarve määrittää taloudellisten resurssien määrä, joka käytetään vuotojen havaitsemiseen ja korjaamiseen. Vuotovesien vähentäminen on väistämättä työvoimaa kuluttava prosessi, jota täytyy pitää yllä koko ajan. Vuotojen paikantaminen vedenjakelujärjestelmän satojen kilometrien putkistoverkossa on haaste, jonka merkitystä ei pidä aliarvioida. (Twort et al. 2000)

Tietystä vedenjakeluverkon osasta mitatut yölliset minimivirtaamat voivat toimia kyseisen alueen vuotojen ja kuluttajien hukaveden indikaattorina. Pienillä asutusalueilla, joissa ei ilmene vuotoja ja syöttömittarit ovat hyvässä kunnossa ilmenee 6–9 % hukkavettä toimitetun veden kokonaismäärästä. Vastaava luku pienissä järjestelmissä, joissa ilmenee vähän vuotoa, on 10–13 % ja tyypillinen pienin mahdollinen luku kokonaisissa kaupungeissa on 16–17 %. Vuotojen määrä riippuu organisaation tappioiden vähentämisestä koskevista käytännöistä sekä järjestelmän iästä ja kunnosta ja käyttöpaineesta. Käytännöt riippuvat puolestaan taloudellisista ja työvoimallisista resursseista. (Twort et al. 2000)

Yritys voi soveltaa vuotojen hallintaan sekä kertaluonteiseen olemassa olevien vuotovesien määrän vähentämiseen tyydyttävälle tasolle että jatkuvaan vuotojen hallintaan vuotojen pitämiseksi saavutetulla tasolla. Aktiivinen vuotojen hallinnan prosessi koostuu vuodoista kertovien todisteiden monitoroinnista, vuotojen havaitsemisesta ja vuotojen korjaamisesta. Yksi vuotojen havaitsemisen työkaluista on virtauksen tarkkailu, joka voi auttaa tunnistamaan järjestelmän häviöiden komponentit. Vuotojen paikantamisen pe-

rinteisiä keinoja ovat 1) hukaveden mittaaminen ja vaiheittainen testaus öisiä virtaamatietoja hyödyntäen, 2) putkesta vuotavan veden ääneen perustuvat vuodonpaikannustekniikat ja 3) visuaalinen havainnointi etsimällä maan pinnalla näkyviä merkkejä vuotoista. (Twort et al. 2000)

Vuotoja aiheuttavien vikojen syitä ovat mm. murtumat kylmän sään jaksojen aikana, maan liikkumista aiheuttavat pitkittyneet kuivat jaksot, kaivostoiminta, asentamisen keho toteutus, putkien ikä tai niiden virheellinen valmistaminen, riittämätön suoja liikenteen kuormitusta vastaan tai putken vahvuus on liian alhainen nykyisille paineille. (Twort et al. 2000)

2.3 Vesihuoltolaitosten digitalisaatio

Tässä luvussa käytetään pohjana ja viitataan paljon Vesihuoltolaitosten digistrategiaan, jonka ovat laatineet Ikäheimo ja Metsävuori (2020). Älykäs vesijohtoverkosto, joka sisällyttää ICT:n olemassa olevaan vesi-infrastruktuuriin on tulossa osaksi uuden sukupolven älykästä vesihuoltoa. Kyseessä on uusi vesihuollon alan konsepti, joka mahdollistaa järjestelmien jatkuvan tarkkailun ja epätavallisten tapahtumien, kuten vuotojen, määrittämisen. (Lalle et al. 2021) Älyvesijärjestelmiä voidaan käyttää parantamaan tilannetta verkostoissa, joissa on heikentynyt infrastruktuuri, epäsäännöllinen toimitus ja alhainen asiakastytyväisyys. Älyvesijärjestelmien avulla voidaan vesihuollosta tehdä kestävämpää ja vähentää taloudellisia tappioita. (Ramos et al. 2019). Kestävyyttä voidaan lisätä ja taloudellisia tappioita vähentää ensisijaisesti laskuttamattomien vesien ja ylivuotojen paremman hallinnan myötä sekä putkirikkoja ennakoimalla. (Ikäheimo & Metsävuori 2020) Älyvesikaupungit käyttävät ICT-perusteisia älykkäitä ratkaisuja täydentääkseen ja parantaa vesihuollon jo olemassa olevaa infrastruktuuria ja teknologiaa. (Keriwala & Patel 2022)

Digitaalisten palveluiden kehittymisen myötä veden kiertoa yhteiskunnassa on mahdollista seurata ja hallinnoida entistä yksityiskohtaisemmin. Digitalisaatio tuo mukanaan uusia keinoja, joilla veden kiertoa luonnon ja rakennetun ympäristön välillä kyetään hallitsemaan tehokkaammin siten, että haitat ympäristölle ovat mahdollisimman vähäiset. Tällainen veden kierron tehokkaampi hallinnointi on tarpeen myös Suomessa, sillä täälläkin on kausia tai alueita, joilla vettä on liikaa tai liian vähän tai vettä kulkeutuu väärin paikkoihin väärään aikaan. (Ikäheimo & Metsävuori 2020) Tällaisia tilanteita ovat esimerkiksi putkistovuodot.

Tärkeintä vesilaitosten kannalta on apu, jota uusi teknologia tarjoaa vesihuollon keskeisimpien haasteiden, kuten laskuttamattomien vesien ja ylivuotojen hallintaan sekä putkirikkojen ennakointiin, ratkomiseen. Tiedon keräämisellä ja hallinnalla on kuitenkin hintansa, sillä kaikki tiedon kerääminen edellyttää myös tiedon hallinointia mm. palvelimien laadunvarmistuksen ja tiedon analysoinnin muodossa. (Ikäheimo & Metsävuori 2020) Vesihuoltolaitoksen toiminnan tehokkuuden kannalta on ensisijaisen tärkeää päättää, mitä dataa on tarpeen kerätä.

Eräs kansainvälinen esimerkki vesihuoltolaitoksissa toteutetuista digitalisaation edistämishankkeista on Wrocław'n vesihuoltolaitos, jossa tietojärjestelmäkokonaisuus on otettu käyttöön vuotovesien hallinnassa. Vesilaitoksen vuotovesien hallinta perustuu erilaisiin sensoreihin, joiden tuottaman datan avulla ohjelmisto tulkitsee ilmenneitä poikkeamia ja esittää ne kartalla. Näin on helpotettu laitoksen toiminnan suunnittelua ja konkreettisten korjaustoimenpiteiden toteutusta. Tämän lisäksi vesihuoltolaitoksella on alettu kehittämään ennakoivaa kunnossapitoa, joka perustuu mm. poikkeamien havainnointiin ennakolta ennen vahinkojen syntymistä. (Ikäheimo & Metsävuori 2020)

International Water Association (IWA) on laatinut listan keskeisistä havainnoista ja toimenpiteistä, jotka edistävät parhaiten vesihuoltolaitosten digitalisaatiota:

1. Digitalisaation tavoitteet on asetettava toimitusjohtajan ja hallituksen tasolla.
2. Kokonaisvaltaisen digitaalisen tiekartan ja selkeän liiketoimintastrategian laatiminen.
3. Työympäristön tulee tukea uusien digitaalisten työvälineiden ja -menetelmien ideoinnin ja edistämisen kulttuuria.
4. Hyödynnetään pilotteja ketterän ajattelutavan muodostamiseen.
5. Tietoarkkitehtuurin kehittäminen tiedon käytön optimoimiseksi.
6. Luo, vaadi, ylläpidä ja kehitä digitaalista ekosysteemiäsi.
7. Vesihuoltolaitosten haasteiden, kuten yhteen toimivuuden, lainsäädännön, kulttuurin ja tietoturvallisuuden parantaminen. (IWA 2019)

Katkon & Pietilän (2017) artikkelissa esitetään kaupunkien kestävä kehittäminen kannalta vesihuollossa korostuviksi seikoiksi: 1) Kasvavilla kaupunkiseuduilla järjestelmissä on jo lisäkapasiteettia tai siihen on varauduttu. Väestökatoalueilla haasteita tulevat aiheuttamaan vesihuoltolaitosten asiakasmäärän ja maksupohjan pienentyminen. 2) Laitoskoon suurentaminen ei automaattisesti paranna tehokkuutta. 3) Ikääntyvän vesihuoltoinfran saneeraukseen tulee panostaa nykyistä huomattavasti enemmän. (Katko & Pie-

tilä 2017) Suomessa yksi merkittävimmistä vesihuollon haasteista on ikääntyvä infrastruktuuri. On ollut jo pitkään selvillä, että vesihuoltoverkosto ikääntyy ja se tulee vaati-
maan saneerausta. (Rajala 2021) Vesihuoltolaitosten investoinnit ovat kuitenkin vain 400
miljoonaa euroa vuodessa, kun määrän pitäisi olla 770 miljoonaa euroa. (RIL 2021)

Ikäheimo & Metsävuori (2020) kirjoittavat vesilaitosten digitalisaation tulevaisuudesta seu-
raavasti: ”Digitalisaation hyödyt saavutetaan parhaiten silloin, kun vesilaitoksen johdolla
on selkeä fokus ja tavoitetila, joita palvellaan eri lähteissä syntyvien tietojen tehokkaalla
integroinnilla, analysoinnilla ja visualisoinnilla. Kestävä vesihuolto rakentuu luotettavuus-
delle, puhtaan veden ja jäteveden toimitusvarmuudelle, asiakaspalvelulle, ennakkoinnille
sekä hyvälle käyttöomaisuuden ja talouden hallinnalle. Tulevaisuuden vesihuoltolaitok-
sissa tietoa kerätään nykyistäkin enemmän. Päätöksenteko tukeutuu kerättyyn ja analy-
soituun tietoon, mikä helpottaa pitkän aikajänteen suunnittelua ja vähentää äkillisiä ja
haitallisia toimenpiteitä. Pitkän aikavälin tavoitteena tulee nähdä elinikäisen oppimisen
mahdollistaminen sekä ennakoiva kunnossapito.”

2.4 Älyvesisovellusten mahdollisuudet ja haasteet

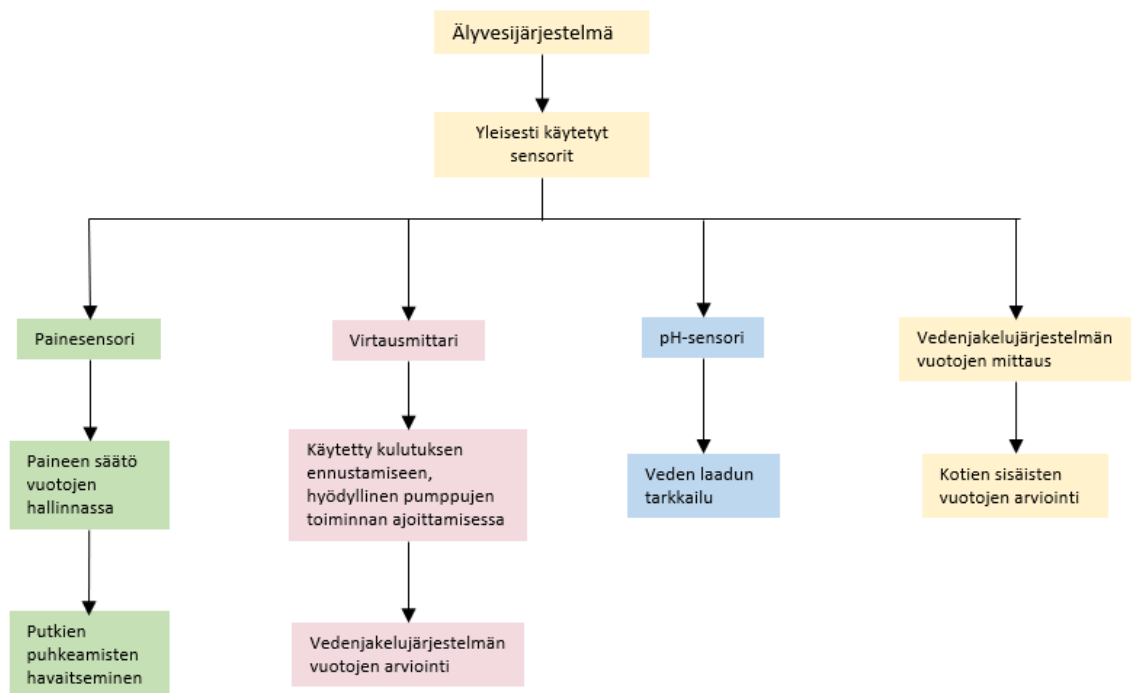
Kuten aikaisemmin todettiin, vedenjakeluverkostot ovat vanhenemassa ja heikkene-
mässä. Ikääntyminen tekee vesijohtoverkostosta alttiimman vuodoille ja muille vioille.
Vesiputkien rikkoutumisten ja vuotojen aiheuttama vesihävikki voi pahimmillaan vaikeut-
taa vesipulaa. (Lalle et al. 2021) Älykkäät vesimittarit auttavat vuotojen ja muiden äkillis-
ten vedenkulutusten havaitsemisessa. Niiden avulla voidaan lisäksi ennustaa tulevia
vuotoja aikaisempien vuotojen ominaispiirteitä tutkimalla. Täten saavutetaan säästöjä ja
parannetaan vesihuollon toiminnan suunnittelua. (Adams & Jokonya 2022) Älykkäiden
vesijohtoverkostojen suunnittelun päämotivaattorina on vuotojen havaitseminen (Lalle et
al. 2021). Älykkäät vesimittarit ovat joiltain osin jo vakiintunutta teknologiaa, joka on ny-
kyisin taloudellista/kustannustehokasta ja josta voivat hyötyä sekä vesilaitokset että ku-
luttajat. Kuluttajille merkittävimpiä etuja ovat vedenkulutuksen taltiointi, etäluenta ja mah-
dollisuus hallita vedenkulutusta ja -kustannuksia. (Adams & Jokonya 2022)

Ensimmäinen haaste, joka viivästyttää laajempaa älyvesiverkoston soveltamista, on to-
delliseen suunnitteluun ja käyttöönottoon opastavan viitekehysten puuttuminen. (Li et
al. 2020) Käyttöönoton hinta, energiankulutus, ylläpito, yksityisyys ja turvallisuus, liitettä-
vyyden kattavuus. IoT-perustaiset järjestelmät ovat laajoja ja haavoittuvaisia kyberuhkia
vastaan, etenkin silloin kun dataa lähetetään serverille. Yleisesti käytössä olevilla lan-
gattomilla tiedonsiirtoprotokollilla on rajoitteita liittyen sekä joidenkin teknologioiden ener-

giantarpeeseen että viestintäetäisyyteen, johon ne kykenevät. Älyvesijärjestelmien suurimpia haasteita on myös järjestelmien asentamisen, käytön ja ylläpidon toimenpiteiden monimutkaisuus. (Palermo et al. 2022).

2.5 IoT ja ICT älykkään vesihuollon osana

IoT voi yhdistää laitteita älykaupungin eri sovelluksissa, joita ovat esimerkiksi älykäs vesijohtoverkosto, älykäs sähköverkko ja älykodit. Älykäs vesijohtoverkosto on yksi IoT-sovelluksista, joka integroi vesijärjestelmään sensoreita, hallintalaitteita, reaaliaikaista monitorointia ja datan visualisointityökaluja, tiedonhallinnan ja tallentamisen ohjelmia sekä analyttisiä komponentteja, jotka monitoroivat ja arvioivat etänä ja jatkuvasti ongelmia vedenjakelujärjestelmässä. Älykkääseen vesijohtoverkoston yhdistettyjen IoT-laitteiden täytyy täyttää joitain vaatimuksia, kuten pitkän kantaman tiedonsiirto, pitkä akkujen käyttöikä, alhaisen tiedonsiirtonopeuden lähetykset, korkean tason tietoturva ja edullinen asennus. (Lalle et al. 2019) Kuvassa 2 on esitelty älykaupunkien älyvesijärjestelmissä yleisesti käytettyjä sensoreita ja niiden sovelluksia.



Kuva 2. Sensorit ja niiden sovelluksia älyvesijärjestelmässä, lähdettä Gupta et al. (2020) mukailten.

Uusia ja olemassa olevia sensoreita, sekä kiinteitä että siirrettäviä, käytetään tarjoamaan lähes reaaliaikaista tietoa vedenlaadusta, virtaamista, paineista ja vedenkorkeuksista muiden parametrien lisäksi. Sensorit voivat olla hajautettuna ympäri järjestelmää, jotta ne voivat auttaa päivittäisissä resurssien optimointitoimissa, kuten kemikaalien annostelussa vedenkäsittelyprosessissa havaita, diagnosoida ja ennakoivasti ehkäistä haitallisia

tapahtumia, kuten putkien rikkoutumisia, veden värjäytymistä ja viemärin tukkeutumista. Mittarit voivat tarjota hyödyllistä informaatiota ennaltaehkäisevän huollon näkökulmasta ja parantaa pitkän tähtäimen suunnittelua vesilaitoksilla esimerkiksi auttamalla priorisoimaan huolto- ja korvaustoimenpiteet ikääntyvälle infrastruktuurille. Samalla tavalla sensorit voivat tarjota todisteita putkien korroosiosta ja varoittaa kuluttajaa ja vesilaitosta, kun veden laadun vaatimukset eivät täyty. Lisäksi älykkäät mittarit tallentavat asiakkaiden vedenkulutuksen, tarjoten selkeän kuvan vedenkulutuksesta ja välittävät tiedon sekä kuluttajalle että vesilaitokselle, mahdollistaen parannellun vesihuollon. (International Water Association 2019) Yhdistämällä reaaliaikaisesti virtaama- ja painetiedot yhteenlaske- tun kulutuksen kanssa, vuotojen havaitsemisen ja paikantamisen tarkkuutta voidaan pa- rantaa. Esimerkiksi ääntä havaitsevia sensoreita on käytetty yleisesti vuotojen havaitse- miseen. Akustiset sensorit kuuntelevat ääniä, joita syntyy veden karatessa putkesta esi- merkiksi vuodon takia. Nämä sensorit voivat lähettää dataa internetin kautta pilveen tai suoraan siirrettävälle, käsikäyttöiselle laitteelle, jolla sensorit voidaan lukea. Akustiset sensorit ovat huomattavasti herkempiä kuin ihmiskorva, ja ne voidaan pitää aktiivisina öisin, jolloin taustamelu on vähäisintä. (Kulkarni & Farnham 2016)

Älykkäässä säätöjärjestelmässä (eng. Intelligent Control System, ICS), jollainen älyvesi- verkostokin on, mittaavat, suorittavat, lähettävät ja vastaanottavat laitteet toimivat niiden hallintaan erikoistuneen ohjelmiston alaisuudessa. Radioverkon lähetyksen luotettavuus- den takaamiseksi on kehitetty ICS:n sisäisiä tiedonsiirtoprotokollia. (Karavaev et al. 2018) Kaupallisesti saatavilla olevat kulutuksen seurannan välineet tukevat erilaisia tie- donsiirtoprotokollia. Toiset tiedonsiirtoprotokollat toimivat lisensoituilla kaistoilla (900/1800/1900MHz,440MHz) ja toiset käyttävät lisenssivapaita kaistoja (169/433/868/915MHz, 2.4GHz). Valinnanvaraa on laajasti eri vaihtoehtojen välillä, joista vesihuollon tarjoaja voi valita riippuen toiminnallisista vaatimuksista (kuten käyttöikä, mit- tausmekanismin tyyppi, laitteen tukeman tiedonsiirtorajapinnan tyyppi jne.) Asentamalla virtaamamittareita ja AMR-sensoreita sekä muita samankaltaisia lähes reaaliaikaista da- taa lähettäviä laitteita kulutuksen tarkkailua varten, voidaan saada hienojakoisempaa tie- toa verrattuna perinteisiin historiallisiin dataa hyödyntäviin metodeihin. (Kulkarni & Farn- ham 2016)

Vesimittari on laite, joka mittaa veden virtaamaa, eli veden kulutusta. Näitä mittareita on olemassa mekaanisia, elektronisia ja ultraäänimittareita. Mekaaninen vesimittarissa on messinkinen virtauksenmittausosa ja 8-numeroinen summanäyttö. Elektroninen vesimit- tari koostuu myös messinkisestä virtauksenmittausosasta, mutta siinä summanäyttö di- gitaalinen. Ultraäänivesimittareiden mittaustekniikka perustuu nimensä mukaisesti ultra-

ääneen. (Pajavirta Oy) Etäluettavuus mittareissa tarkoittaa sitä, että tarkasteltavan mittarin data on luettavissa etänä, yleensä radioverkon (esimerkiksi AMR-verkko) kautta (Virtanen 2020). Älykäs mittaaminen voidaan luokitella automaattiseksi luennaksi (eng. automated meter reading, AMR) tai edistyneeksi mittausinfrastruktuuriksi (eng. advanced metering infrastructure, AMI) riippuen mittaamisen, ohjauksen tai toiminnallisuuden edistyneisyydestä. Sitä voidaan käyttää myös näiden kahden kattoterminä. (Msamadya et al. 2022) Älykkäisiin mittareihin on tyypillisesti sisällytetty integroitu ohjain, joka kommunikoi sensorin kanssa ja langaton lähetin. 10–15 vuoden akun käyttöikä on yleinen, koska mittareilla ei yleensä ole käytössä verkkovirtalähdettä. Älykkään mittausjärjestelmän tiedonsiirto voidaan suorittaa hyödyntäen useita tiedonsiirtokanavia, joita ovat radioviestiliikenne, Internet tai matkapuhelinyhteydet. Älykkäille vesimittareille on tyypillistä kerätä kulutustietoja ja siirtää ne sitten tukiaseman (eng. gateway) kautta palvelimelle. (Keriwala & Patel 2022)

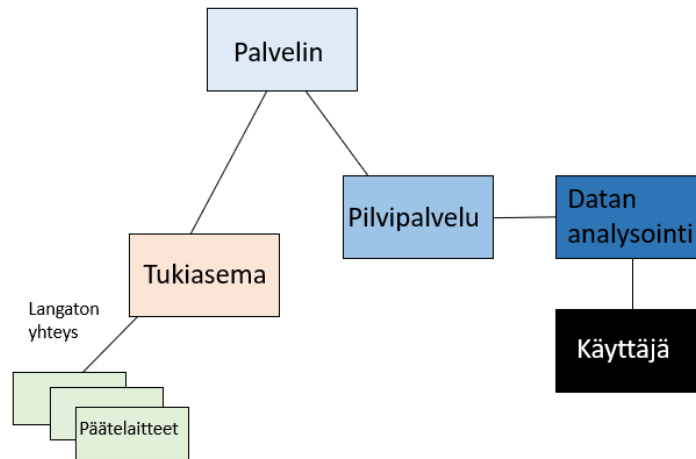
3. TIEDONSIIRTOPROTOKOLLAT

Tässä luvussa käsitellään tarkemmin uuden sukupolven tiedonsiirtoprotokollia, jotka mahdollistavat älyvesiverkoston konkreettisen toteutuksen ja ennen kaikkea IoT-laitteiden yhdistämisen osaksi tietoverkkoa. Markkinoille on ilmestynyt uudenlaisia pienitehoisia langattomia tietoverkkoteknologioita, jotka voivat vastata älykkäiden vesijohtoverkoston tiedonsiirtovaatimuksiin. Näitä teknologioita ovat mm. LoRaWan, Sigfox, NB-IoT, Ingenu RPMA, DASH7, Weightless, Symphony Link ja Wireless M-Bus, jotka esitellään tässä luvussa. Vesimittareiden tiedonsiirto on toteutettu aiemmin langallisesti, kuten M-Busia käsittelevässä luvussa 3.5.8 käy ilmi. Näistä vaihtoehdoista Wireless M-Bus on nimittäin vanhemman langallisen tiedonsiirtoteknologian perustalle rakennettu langaton sovellus.

3.1 Tiedonsiirtoprotokollien yleinen rakenne ja sovelluksia

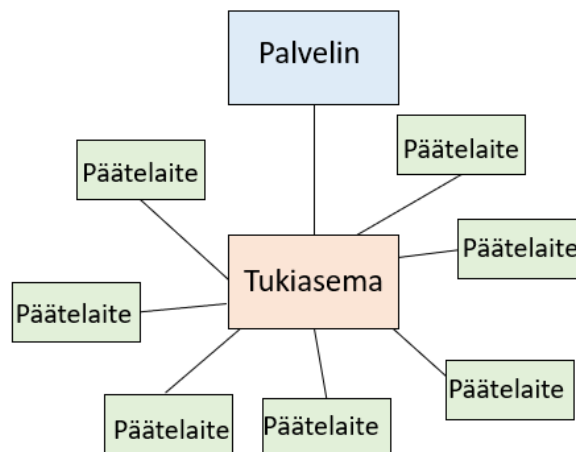
Pienitehoisella laajaverkolla (eng. Low Power Wide Area Network, LPWAN) on sovelluskohteita harvaan asutuilla alueilla, joilla mobiiliverkon kenttä on heikko ja infrastruktuurin rakentaminen Wi-Fille tai vastaavalle verkolle saattaisi tulla kalliiksi haastavan maaston tai laajalle alueelle sijoitettujen sensorien takia. Taajama-alueiden sovelluksia ovat mm. älykäs pysäköinti, tulvien seuranta, sääasemat, infrastruktuurin seuranta, älykäs mittaminen, valojen säätäminen tai jätehuolto. (Queralta et al. 2019)

Kaikille tiedonsiirtoprotokollavaihtoehdolle yhteisiä elementtejä ovat päätelaitteet (eng. end device), tukiasemat ja verkkopalvelin (eng. network server). Päätelaite on yksinkertainen laite, joka koostuu sensoreista ja/tai toimilaitteista ja joka on varustettu lähettävällä vastaanottimella (eng. transceiver). Se kerää informaatiota ja lähettää sen sitten tukiasemalle. (Ayoub et al. 2018) Tällainen päätelaite on esimerkiksi älykäs vesimittari. Päätelaitteet lähettävät datan tukiasemien kautta verkkopalvelimelle. Tukiasemat toimivat siis tiedonvälittäjinä päätelaitteiden ja serverin välillä. (Lalle et al. 2019) Kuvassa 4 on esitetty tiedonsiirtokokonaisuuden yleinen perusrakenne.



Kuva 3. Älyvesiverkon tiedonsiirtokokonaisuuden esimerkkirakenne

Tiedonsiirtoverkko on siis laajempi kokonaisuus kuin pelkkä langaton tiedonsiirto, joka on toteutettu esimerkiksi radioverkolla. Dataa täytyy myös tallettaa ja analysoida sen lisäksi, että sitä siirretään. LPWAN-verkot ovat yleensä tähtitopologisia. (Aggarwal & Nasipuri 2019) Kuvassa 5 on yksinkertainen esitys tiedonsiirtoverkon tähtitopologiasta.



Kuva 4. Tiedonsiirtoverkon tähtitopologia.

Edellä kuvattujen rakenteiden ja mainittujen osien lisäksi joillain tiedonsiirtoprotokollilla on uniikkeja ratkaisuja ja elementtejä. Verkkoon voidaan esimerkiksi lisätä verkon kantamaa parantavia laitteita, toistimia (eng. repeater).

LPWAN-verkoille löytyy sovelluskohteita teollisuudesta, jolloin on yleensä kyse teollisesta esineiden internetistä (eng. Industrial Internet of Things, IIoT). Teollisuuden sovellukset asettavat tiedonsiirtoverkolle omat vaatimuksensa. Esimerkiksi on suotavaa, että verkko on yksityinen. Viestien kuittaukset ovat myös tärkeitä teollisissa sovelluksissa toisin kuin taajama-alueiden sovelluksissa. Lisäominaisuudet, kuten viestin lähetys yhdestä laitteesta moniin vastaanottimiin, helpottavat laiteohjelmiston päivittämistä. Toisin kuin

julkisissa verkoissa, joissa tämä ominaisuus ei ole merkittävä johtuen suuresta määrästä erilaisia laitteita, teollisuuden sovelluksissa laitteet ovat homogeenisempia. (Queralt et al. 2019)

3.2 Tiedonsiirtoprotokolla vesihuollon toimintaympäristössä

Älykkääseen vesijohtoverkoston liitettävien IoT-laitteiden on oltava energiatehokkaita, sillä monissa tapauksissa ne on asennettava hankalakulkuisiin paikkoihin, kuten putkistoon maan alle. Älykkääseen vesijohtoverkoston asennettavilla laitteilla ja niiden akuilla on oltava maksimaalinen käyttöikä. (Lalle et al. 2019) Eri lähteiden mukaan tavoiteltu käyttöikä akuille on 10–15 vuotta (Lalle et al. 2019, Buurman et al. 2020).

Jotta valtava määrä älykkään vesi-infrastruktuurin IoT-laitteita voidaan yhdistää ja palvelut integroida järjestelmään, vaaditaan tiedonsiirteknologialta skaalautuvuutta. Siksi älykäs vesijohtojärjestelmä vaatii parhaimman skaalattavuuden omaavat viestintäteknologiat monien laitteiden tukemiseksi. (Lalle et al. 2019) Vesihuollon kannalta rakenteellinen skaalautuvuus on oleellisempaa kuin kuormituksen skaalautuvuus. Rakenteellinen skaalautuvuus määrittelee, kuinka monta päätelaitetta LPWAN-verkkoon voidaan kytkeä. Tämä voidaan määritellä joko siten, että lasketaan laitteet tukiasemaa kohden tai tukiasemat yhtä maantieteellistä aluetta kohden.

Älykäs vesijohtoverkoston IoT-laitteiden, ylläpidon ja asennuksen hintojen on oltava mahdollisimman alhaiset, jotta järjestelmän kokonaishinta pysyy alhaisena. (Lalle et al. 2019) Järjestelmään voidaan asentaa sitä enemmän laitteita, mitä halvempia ne ovat.

Älykkääseen vesijohtoverkoston asennetut IoT-laitteet sijoittuvat toisistaan useiden kilometrien päähän, jolloin vaaditaan pitkän kantaman tiedonsiirtoa, jotta data siirtyy verkostossa laitteelta toiselle tehokkaasti. (Lalle et al. 2019) Yleisesti hyväksyttävän verkon kantaman on sovittu olevan muutama kilometri taajamassa ja jopa kymmeniä kilometrejä harvaan asutulla alueella. LPWAN-verkolle tavoitekantama on taajamissa 5 km ja harvaan asutuilla alueilla 10 km. (Buurman et al. 2020) Pitkän kantaman lisäksi sensoreiden ja mittareiden keräämän datan siirtämisessä ei saa olla pitkiä viiveitä, jotta nopea päätöksenteko mahdollistuu. (Lalle et al. 2019) Sensoreiden ja mittareiden keräämän datan siirtämisessä ei myöskään saa olla pitkiä viiveitä, jotta nopea päätöksenteko mahdollistuu (Lalle et al. 2019).

Jotta älykkäälle vedenjakelulle voidaan taata tietty vakaus, käytettävän viestintäteknologian on oltava luotettavaa. Luotettavuuden avulla voidaan ratkaista perinteisen vedenjakelijärjestelmän ongelmia, katkoksia ja häiriöitä. Älyvesikontekstissa luotettavuus tarkoittaa järjestelmän kykyä täyttää tiettyjä vaatimuksia liittyen esimerkiksi viiveeseen ja

tiedonsiirtonopeuteen. (Lalle et al. 2019) Kyberturvallisuus on yksi nousevista älykkäiden verkostojen vaatimuksista, joten myös älykkääseen vesijohtoverkoston vaaditaan protokollat, joiden turvallisuus on korkeaa luokkaa. (Lalle et al. 2019) Kyberturvallisuus on oleellinen vaatimus vesihuollon näkökulmasta, sillä vesihuolto ja vesijohtoverkostot ovat osa kriittistä infrastruktuuria, mikä edellyttää korkeaa luotettavuutta.

Merkittävä tiedonsiirtoinfrastruktuurin ominaisuus on myös riittävä kaistanleveys. Koska älykäs vesijohtoverkosto vaatii useiden IoT-laitteiden yhteen kytkemisen, tiedonsiirtoinfrastruktuurilla on oltava kapasiteettia siirtää useita viestejä samanaikaisesti siten, että verkon nopeus ei kärsi. (Lalle et al. 2019)

Muita tiedonsiirtoverkon rakentamisessa huomioitavia asioita ja valintoja, joita LPWAN-verkkoa suunniteltaessa joudutaan tekemään, kuten taajuusalueeseen ja modulaatiotekniikkaan liittyen. Näitä valintoja on esimerkiksi valinta lisenssivapaa ja lisensoidun kaistan väliltä. Tämä valinta tehdään ensimmäisten valintojen joukossa, koska tämä tulee vaikuttamaan muihin verkon rakentamisessa huomioitaviin asioihin.

Kun on valittu lisensoitujen ja lisenssivapaiden taajuusalueiden väliltä, seuraa tarkempi taajuuskaista valinta valitulta alueelta. Toisin sanoen määritellään verkon operointitaajuus ja kaistanleveys. Valinta koostuu kahdesta elementistä, jotka ovat 1) kantaallon taajuuden (eng. carrier band) valinta ja 2) taajuusalueiden, joita verkko voi käyttää yhtäaikaisten viestien lähettämiseen, valinta. Kantaallon taajuudella on merkittävä vaikutus LPWAN-verkon kantamaan. (Buurman et al. 2020)

Seuraavaksi käsitellään modulaatiotekniikan ja käyttömetodin valinta. Modulaatiotekniikka vaikuttaa langattoman verkon bittivirheiden määrään ja linkkibudjettiin. Kanavan käyttömetodilla (eng. channel access method) puolestaan on merkittävä vaikutus verkon skaalautuvuuteen, sillä se määrittää, kuinka monta laitetta voidaan kytkeä verkkoon yhtä aikaa.

Yksisuuntaiset järjestelmät ovat täysin sopimattomia mille tahansa LPWAN-verkolle, jossa tarvitaan jonkinlaista toimintojen tai viestien kuittausta. Kaksisuuntaiset (dupleksiset) järjestelmät voivat vastata näihin vaatimuksiin, mutta aiheuttavat kuitenkin suuremmat kustannukset ja kuluttavat enemmän energiaa. Yksisuuntaiset (simpleksiset) järjestelmät voivat olla käyttökelpoisia, kun tarvitaan erittäin edullista ja energiatehokasta verkkoa ilman kuittauksia tai toimintoja. (Buurman et al. 2020)

Liiketoimintamalli on organisaation strategia, jolla se pyrkii hyötymään LPWAN-tekniologiasta. Tarkasteltaessa olemassa olevia LPWAN-verkkoja, voidaan havaita kaksi pääliiketoimintamallia, jotka ovat tilaajaperusteinen ja tuotantoperusteinen. Tilajaperusteinen

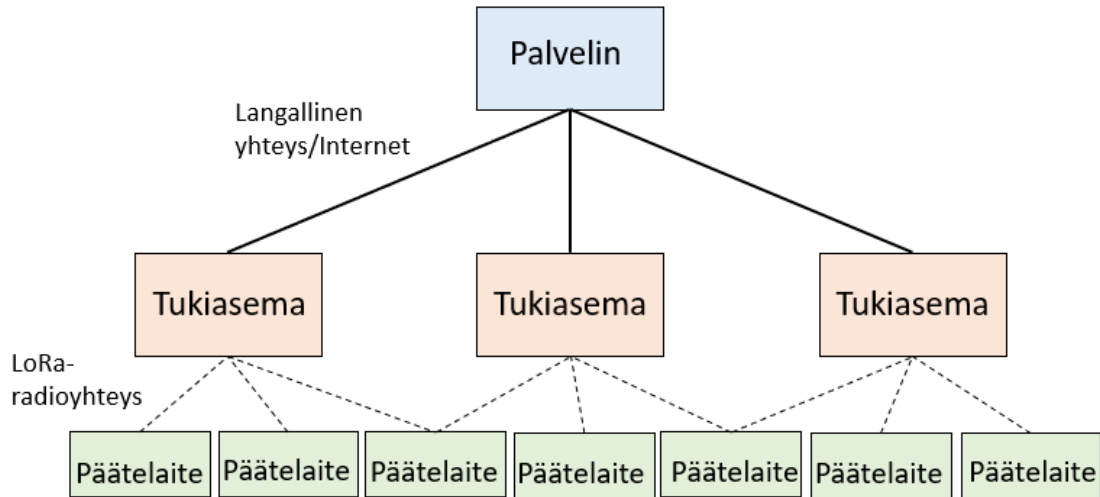
sessä tilaajat maksavat kuukausittaisia maksuja ja mahdollisesti etukäteismaksuja verkon käytöstä. Maksettu summa saattaa vaikuttaa siihen, montako laitetta verkkoon voidaan yhdistää, paljonko dataa voidaan siirtää ja minkä kokoisia viestejä voidaan lähettää ja mikä näiden viestien prioriteettijärjestys on. Organisaatiot ovat vastuussa infrastruktuurin käyttöönotosta ja ylläpidosta, mutta omaavat vallan kumota tai rajoittaa käyttäjän pääsyn verkkoon. Tuotantoperusteisessa verkossa käyttäjien on mahdollista rakentaa oma verkko ja kasvattaa sen rakenteellista skaalautuvuutta ja kantamaa lisäämällä tukiasemia ja toistimia. Kuitenkin on olemassa käytännön rajoitus sille, missä määrin tämä voidaan toteuttaa. Verkon käyttöönotto, ylläpito ja hallinnoiminen tuovat mukanaan kasvavat ja arvaamattomat kulut. (Buurman et al. 2020)

3.3 Vaihtoehtoiset tiedonsiirtoprotokollat

Tässä alaluvussa esiteltävistä tiedonsiirtoprotokollista tällä hetkellä LoRaWAN ja Sigfox ovat kaikkein suosituimpia LPWAN-ratkaisuja. LoRaWAN ja Symphony Link, joista LoRaWAN on suositumpi, ovat laajimmin käytössä olevat LoRa-modulaatiolla toimivat tiedonsiirtoprotokollat. Näistä LoRaWAN on avoin standardi, kun taas Symphony Link on patentoitu. Sigfox ja RPMA ovat kaikista suosituimmat niistä ratkaisuista, jotka eivät käytä LoRa-modulaatiota. Weightless-teknologiat ovat myös hyvin tunnettuja. (Queralta et al. 2019)

3.3.1 LoRaWAN

LoRaWAN on LoRa Alliancen LoRan langattoman teknologian pohjalta kehittämä avoimen standardin tiedonsiirtoprotokolla (Lalle et al. 2019). Se toimii fyysisenä kerroksena LoRa-radioverkon päällä (Queralta et al. 2019). LoRaWAN koostuu kolmesta pääkomponentista, jotka ovat päätelaitteet, esimerkiksi mittarit, tukiasemat ja verkkopalvelin. Päätelaitteet keräävät dataa ja lähettävät sitä tukiasemien kautta verkkopalvelimelle. Tukiasemat toimivat siis tiedonvälittäjinä päätelaitteiden ja serverin välillä. (Lalle et al. 2019) LoRaWAN käyttää AES128b-suojausta ja sillä on mukautuva tiedonsiirtonopeus (eng. adaptive data rate) (Raza et al. 2017). LoRaWAN-verkolle ominainen verkkotopologia on ns. "star-of-stars" (Lalle et al. 2019). Tämä topologia on havainnollistettuna kuvassa 5.



Kuva 5. LoRaWAN-verkon verkkotopologia, "star-of-stars".

LoRa toimii lisenssittömillä, alle GHz:n ISM-kaistoilla (esimerkiksi Euroopassa 868 MHz:n taajuudella). Koska LoRa toimii lisenssittömillä kaistoilla, käyttö määrää on rajoitettu, esimerkiksi EU:n säädännöllä 1 %. LoRaWAN tarjoaa tiedonsiirtonopeutta, joka vaihtelee välillä 300 bps-50 kbps riippuen hajautuskertoimesta ja kaistanleveydestä. Suurin mahdollinen tietosisältö on 243 tavua. LoRaWAN-päätelaitteiden akunkesto voi ylittää jopa yli 10 vuoteen.

LoRaWAN-verkossa on kaksi erilaista lähetysvaihtoehtoa, jotka ovat UL- ja DL-lähetys. UL viittaa viesteihin, joita päätelaitteet lähettävät serverille yhden tai useamman tukiaseman kautta. Kaikki lähetyskäytävällä olevat tukiasemat saavat päätelaitteiden lähettämät viestit. Tukiasemat lähettävät datan palvelimelle, joka tarkistaa datan eheyden, poistaa turhat vastaanotetut tiedot ja lopulta tunnistaa vastaavan sovellusserverin ja lähettää datan. DL-viestinnällä tarkoitetaan puolestaan sitä, kun serverit lähettävät tietoa päätelaitteille. Tämä data voi olla esimerkiksi kuittaus tai joku muu tietty viesti, jonka palvelimen täytyy saada lähetettyä päätelaitteille. (Lalle et al. 2019) LoRaWAN tukee DL-suuntaista liikennettä esimerkiksi kuittausten, laiteohjelmistopäivitysten tai MAC-komentojen muodossa. (Marais et al. 2019) Päivässä UL- tai DL-suuntaan lähetettyjen viestin määrää ei ole rajoitettu. Tiedonsiirto LoRaWAN-verkossa UL-suuntaan alkaa päätelaitteen aktivoitumisesta. Kun päätelaite on aktivoitu, se liittyy LoRaWAN-verkkoon ja kommunikoi tukiasemien välityksellä palvelimen kanssa. (Lalle et al. 2019)

IoT:n mahdollistajana LoRan edut ovat 1) pitkän kantaman lähetykset jopa yli 10 kilometriin, 2) solmulaitteiden ja tukiasemien käyttöönoton edullisuus johtuen LoRa-lähetin-vastaanottimien alhaisesta hinnasta ja pienentyneestä tukiasemien määrästä, esimerkiksi Wi-Fi- tai Bluetooth-ratkaisuihin verrattuna, 3) mukautuvat kaistanleveys ja hajau-

tuskerroin, jotta luotettavuutta erilaisissa kanavaolosuhteissa paranee, ja jotta mahdollistetaan monikanavavastaanottimien (eng. multi-channel transceiver) rinnakkainen toiminta sekä yhden tukiaseman datan vastaanottaminen jopa tuhansilta solmulaitteilta, 4) akkukäyttöisten laitteiden hyvin vähäinen energiankulutus ja 5) ja ortogonaalinen lähetys eri hajautuskertoimia käyttäen, tarvitsematta luopua lähetyksen luotettavuudesta. (Queralta et al. 2019) LoRaWANin skaalautuvuus on heikko (Rama & Özpmar 2018). Queralta et al. (2019) esittää, että LoRaWAN on sopiva pienen mittakaavan käyttöön tai julkisiin sovelluksiin.

Langaton LoRaWAN-tiedonsiirtoprotokolla rakennettiin, jotta saavutettaisiin pitkän kantaman tiedonsiirto, vähennettäisiin kuluja ja poistettaisiin toistimet ja täten verkosta tulisi yksinkertaisempi (Alghamdi et al. 2022). LoRaWAN-verkossa voidaan kuitenkin käyttää toistimia (Wang 2021).

3.3.2 Sigfox

Sigfox-tiedonsiirtoprotokollan patentoi Sigfox-yhtiö (Lalle et al. 2019). Sigfox esiteltiin vuonna 2009 ja se oli ensimmäinen LPWAN IoT:tä varten (Queralta et al. 2019). Sigfox-verkolla on LoRaWAN-verkon kaltainen topologia, jossa päätelaitteet on yhdistetty pilveen differential binary phase shift keying (D-BPSK) -modulaatiota käyttävien tukiasemien kautta. Sigfox-päätelaitteiden akun keston luvataan olevan jopa enemmän kuin 10 vuotta. Verkon kantama on taajamassa 3–10 km ja haja-asutusalueella 20–40 km. Kuten LoRaWAN, myös Sigfox toimii lisenssittömällä alle GHz:n ISM-taajuuskaistoilla, mikä tarkoittaa Euroopassa 868MHz:n taajuutta. (Lalle et al. 2019) Koska Sigfox myös toimii lisenssittömällä kaistoilla, myös sitä koskevat samat käyttömäärän rajoitukset kuin LoRaWANia, mikä on esimerkiksi EU:ssa 1 % (Lalle et al. 2019, Vejlgard et al. 2017).

Sigfox käyttää Ultra-Narrow Band (UNB) -modulaatioteknologiaa ja sen MAC-kerros on Aloha-perusteinen. Sigfoxin tukiasemat siis lähettävät dataa ultrakapealla kaistalla (100Hz). UNB-teknologian käyttäminen alle GHz:n ISM-kaistoilla mahdollistaa taajuuskaistan hyödyntämisen tehokkaasti ja tarjoaa erittäin alhaisen häiriötason. Tämä johtaa pieneen energiankulutukseen ja korkeaan vastaanottimien herkkyyteen. Sigfoxin uudempi versio tukee sekä UL että DL-lähetystä. Suurin mahdollinen tietosisältö on UL-suuntaan 12 tavua ja DL-suuntaan 8 tavua. (Lalle et al. 2019) Verkon tiedonsiirtonopeus on UL-suuntaan 100 bps ja DL-suuntaan 600 bps (Raza et al. 2017). Sigfox-verkon skaalautuvuus on alhainen. Sigfox on puolidupleksinen tiedonsiirtoprotokolla. (Rama & Özpmar 2018)

UL-tietoliikenteessä on mahdollista lähettää 140 viestiä päivässä ja DL-tietoliikenteessä 4 viestiä päivässä. Sigfoxin UL-viestintä toimii siten, että päätelaitteen lähettämä viesti

vastaanotetaan millä tahansa tukiasemalla, joka on kantaman sisällä. Tukiasemat kuuntelevat kaikkia vapaana olevia kanavia saadakseen viestin, jonka vastaanottaa keskimäärin kolme tukiasemaa. Tukiasemat voivat vastaanottaa viestin samanaikaisesti kaikilla vapailta kanavilla. Tukiasemat puolestaan lähettävät saman viestin edelleen Sigfox-pilveen, joka on verkon ydin. Pilvi vastaa viestin käsittelystä ja asiakkaalle lähettämisestä. Siinä on myös työkaluja datan analysoimiseen. DL-lähetys toimii samoin, mutta vastakkaiseen suuntaan. (Lalle et al. 2019) Sigfoxilla on heikko skaalautuvuus (Rama & Özpınar 2018).

3.3.3 NB-IoT

NB-IoT (Narrow-Band IoT) käyttää LTE-taajuusaluetta ja päätelaitteiden akkujen luvataan tässä tiedonsiirtoprotokollassa kestävän 8–10 vuotta. Verkon kantama on taajamassa arviolta 1 km ja haja-asutusalueella 10 km. (Lalle et al. 2019) Koska NB-IoT toimii lisensoituilla kaistoilla, sitä eivät koske käyttömäärän rajoitukset eikä se, että laitteiden pitää kuunnella verkkoa ennen kuin ne lähettävät dataa (Vejlgaard et al. 2017). Verkko käyttää 200 KHz:n kaistanleveyttä, mikä vastaa resurssilohkoa GSM- ja LTE lähetyksissä. Verkolla on tähtitopologia. NB-IoT käyttää LTE-perusteista modulaatioteknologiaa ja MAC-kerrosta. NB-IoT:n tiedonsiirtonopeus on UL-lähetykselle 200 kbps ja DL-lähetykselle 20 kbps. Jokaisen viestin suurin mahdollinen tietosisältö on 1600 tavua. (Lalle et al. 2019) NB-IoT-verkolla on hyvä skaalautuvuus. Verkko on joko puoli- tai täysin duplexinen. (Rama & Özpınar 2018)

NB-IoT käyttää hyväkseen jo olemassa olevia matkapuhelinverkkoja ja se voi yhdistää jopa 100000 päätelaitetta verkon solua kohden. 200 KHz:n kaistanleveydellä NB-IoT voi käyttää kolmea erilaista operointitilaa, jotka ovat 1) 'stand alone', jossa NB-IoT voi käyttää yhtä tai useampaa olemassa olevaa puhelinoperaattoria, 2) 'guard band', jossa hyödynnetään käyttämättömiä resurssilohkoja ja 3) 'in-band', jossa käytetään hyväksi LTE-operaattorin verkon resurssilohkoja. (Lalle et al. 2019) NB-IoT käyttää toistimia parantaakseen lähetyksen kantamaa. Mahdollinen toistimien määrä on ennalta määritelty ja säännelty. (Sarkar 2022)

3.3.4 Ingenu RPMA

Random Phase Multiple Access (RPMA) on Ingenun vuonna 2010 patentoima teknologia. Tämä LPWAN-teknologia mahdollistaa tiedonsiirtoverkolle paljon suuremman linkkikapasiteetin (eng. link capacity) kuin LoRa tai Sigfox. Se on suunniteltu tavoitteena pienentää kokonaiskustannuksia ja kasvattaa tukiasemien kantamaa. (Queralta et al. 2019) Ingenu RPMA-laitteiden akun eliniäksi luvataan 10 vuotta. (Raza et al. 2017)

Ingenu RPMA toimii lisenssivapaalla 2,4 GHz:n ISM-kaistalla toisin kuin suurin osa LPWAN-teknologioista, jotka käyttävät alle GHz:n taajuuksia (Queralta et al. 2019). Tälle kaistalle ei ole raskaita käyttömäärän rajoituksia, toisin kuin alle GHz:n kaistoille (Foubert & Mitton 2020). 2,4 GHz:n kaistan käyttämisestä on etuna myös se, että sillä on yhdenmukaisesti hoidettu valvonta maailmanlaajuisesti. Toisaalta, 2,4 GHz on laajalti käytetty useissa muissa teknologioissa, kuten Wi-Fi:ssä ja Bluetoothissa, ja siksi häiriö on todennäköisempää kaistan ollessa tukkoinen. Ingenu RPMA:n kaistanleveys on 1 MHz. Verkko on tähtitopologinen. (Raza et al. 2017) RPMA:n perustana on direct sequence spread spectrum (DSSS) -tekniikka (Queralta et al. 2019). RPMA:n UL-suuntaan käytämä modulaatioteknologia on RPMA-DSSS ja DL-suuntaan CDMA. RPMA:n MAC-kerros on CDMA-tyyppinen. Kommunikaatio verkossa tapahtuu DL- ja UL-suuntiin. Verkon laitteet skannaavat taustalla siten, että jokaiselle lähetykselle valitaan paras tukiasema. (Queralta et al. 2019) Verkon tiedonsiirtonopeus on UL-suuntaan 78 kbps ja DL-suuntaan 19,5 kbps. (Raza et al. 2017) Ingenu RPMA tarjoaa suurimman datansiirtonopeuden verrattuna useimpiin LPWAN-teknologioihin. Todellinen lähetyksenopeus tosin riippuu kanavan olosuhteista. (Queralta et al. 2019)

Verkolla on mukautuva tiedonsiirtonopeus. Suurin mahdollinen tietosisältö on 10 kilotavua. Langattomat päivitykset ovat Ingenu RPMA -verkossa mahdollisia. (Raza et al. 2017) Verkon skaalautuvuus on hyvä. Ingenu RPMA on puoliduplexinen. (Rama & Özpmar 2018)

Yksi merkittävimmistä Ingenu RPMA:n eduista LoRaan ja Sigfoxiin verrattuna on sen tietoverkon kapasiteetti. Ingenun mukaan yksi heidän tukiasemansa voi käsitellä jopa 2 miljoonaa päätelaitetta. RPMA tukee jopa 1200 rinnakkaisen signaalin demodulaatiota samalla taajuudella. (Queralta et al. 2019)

Ingenu RPMA tarjoaa samanlaiset yleiset ominaisuudet kuin Symphony Link. Kuten Symphony Link, myös Ingenu RPMA vaatii, että kaikki verkon tukiasemat on synkronoitu, jotta päätelaitteet ovat kaikki samassa ajassa. Toinen samankaltaisuus on lähetyksen kanavan olosuhteisiin mukautuva hajautuskerroin, jolla protokolla säästää energiaa. Suurimmat eroavaisuudet näiden kahden protokollan välillä ovat Ingenu RPMA:n isompi kapasiteetti tukiasemaa kohden ja lähetykseen käytetty taajuuskaista. RPMA:n korkeampi taajuus tarkoittaa kuitenkin sitä, että läpäisyteho useimpien materiaalien läpi on heikompi. RPMA:n DL-kapasiteetti on paljon suurempi kuin Symphony Linkin johtuen mukautuvan hajautuskertoimen metodologiasta. (Queralta et al. 2019) Ingenu RPMA:lle on arvioitu kantamaksi taajamassa 15 km. (Raza et al. 2017) RPMA:lla on hyvä skaalautuvuus (Rama & Özpmar 2018).

3.3.5 DASH7

DASH7 Alliance (D7A) on ISO/IEC 18000-7:n mukainen, avointen lähteiden aktiivinen RFID-standardi WSAN-protokollalle. ISO/IEC 18000-7 puolestaan on avoin standardi lisenssivapaalle 433 MHz:n ISM-kaistan langattomalle tiedonsiirrolle. Tästä syystä käyttömäärälle on asetettu rajoitukset. 433 MHz:n taajuus mahdollistaa pitkän kantaman ja paremman läpäisyn. Kokonainen seitsemän kerroksen OSI-malli tunnetaan D7A-protokollana (D7AP). (Ayoub et al. 2018) Joidenkin peruselementtiensä osalta D7AP on arkkitehtuuriltaan samanlainen kuin LoRaWAN. Siinä on mm. päätelaitteet ja tukiasemat. Verkkopalvelimella on samat ominaisuudet ja toiminnot vastaavien LoRa-laitteiden kanssa. Se kokoaa yhteen vastaanotetun datan, poistaa tarvittaessa kaksoiskappaleet ja valitsee lähimmän tukiaseman päätelaitteelle DL-suunnan lähetykselle. (Ayoub et al. 2018)

Tukiasemat on suunniteltu toimimaan mahdollisimman pienellä energiankulutuksella ja olemaan lepotilassa suurimman osan ajasta. Laite käyttää jaksottaista herätystä kuunnellakseen mahdollisia saapuvia lähetyksiä. D7A-verkko voi sisältää myös aliohjaimia. Nämä ovat samantyyliä laitteita kuin päätelaittekin, ja niitä voidaan käyttää tiedonvälitykseen päätelaitteiden ja tukiaseman välillä. D7A tarjoaa kantaman aina kahteen kilometriin asti, alhaisen viiveen sekä noin 10 vuoden akunkeston. D7A-verkon tukiasemat ovat aina vastaanottavassa tilassa, elleivät ne ole lähettämässä sanomaa. Ne vastaanottavat datan päätelaitteilta, prosessoivat sen ja välittävät sen edelleen IP-verkkoon tai lähettää sen johonkin toiseen DASH7-verkkoon. (Ayoub et al. 2018)

D7A-verkon modulaatioteknologia on GFSK ja MAC-kerros CSMA/CA. Suurin mahdollinen tietosisältö on varsin pieni, vain 256 tavua. (Ayoub et al. 2018) D7A tarjoaa mukautuvan tiedonsiirtonopeuden (Aravind et al. 2018). D7A-verkossa lähetetään lyhyitä ja satunnaisia datasekvenssejä ja viestintä on komentoperusteista ilman jaksollista synkronisointia. Päätelaitteet kommunikoivat vain ennalta hyväksytyin tukiaseman kanssa. Päätelaitteita voidaan siirrellä saumattomasti eri tukiasemien välillä, jos kantama riittää. (Ayoub et al. 2018)

3.3.6 Weightless-P

Weightless on Weightless Special Interest Groupin kehittämä avoin standardi. Yhtiö kehitti alkujaan kolme LPWAN-teknologiaa, jotka ovat Weightless-W, -N ja -P. N- ja P-versiot käyttävät molemmat alle GHz:n kaistoja. (Queralta et al. 2019) Koska Weightless-N ja -W ovat keskittyneet erittäin mataliin kustannuksiin ja TV-kaistojen tyhjään tilaan, näistä versoista Weightless-P on enemmän LPWAN-teknologioiden kaltainen. (Rama & Özpmar 2018) Tästä syystä tässä työssä Weightless-sarjasta tarkasteltavana on vain

Weightless-P. Weightless-P-verkkoon liitetyille laitteille luvataan 10 vuoden akunkesto (Rama & Özpmar 2018). Weightless-P-verkon kantama on enintään 2 km (Shpak & Abramenko 2018). Weightless-P toimii lisenssivapaalla 169–923 MHz:n taajuusalueella, ja sen kaistanleveys on 12,5 kHz. Verkko on tähtitopologinen. (Aggarwal & Nasipuri 2019)

Weightless-P tarjoaa pakettien kuittauksen ja kaksisuuntaisen kommunikaation (Queralta et al. 2019). MAC-kerros on TDMAFDMA (Raza et al. 2017, Queralta et al. 2019). Modulaatioteknologia on PSK, GMSK. Tiedonsiirtonopeus on 0,2–100 kbps. Weightless-P:llä on heikko skaalautuvuus (Rama & Özpmar 2018). Weightless-P käyttää AES-128-salausta. (Aggarwal & Nasipuri 2019)

3.3.7 Symphony Link

Symphony Link on Link Labsin kehittämä patentoitu tiedonsiirtoprotokolla, joka hyödyntää LoRa-modulaatiota. Symphony Link tarjoaa edistyneemmän standardin LoRa-verkolle. (Queralta et al. 2019) Symphony Linkin lupaama kantama on taajamassa 5 km ja haja-asutusalueella 15 km. (Kuzlu et al. 2018) Kyseessä on tiedonsiirtoprotokolla, joka tarjoaa ratkaisun käyttömäärän rajoituksiin hyödyntämällä taajuushypintää ja erilaisia käytettävissä olevia taajuuksia. (Queralta et al. 2019) Symphony Linkin kapasiteetti on nelinkertainen verrattuna LoRaWaniin. Se käyttää samoja alle GHz:n ISM-kaistoja kuin useimmat muutkin LPWAN-teknologiat, esimerkiksi EU:ssa 868 MHz. (Kuzlu et al. 2018) Symphony Linkin herkkyys on käytännössä sama kuin LoRaWANilla. (Queralta et al. 2019) Sen suurin mahdollinen tiedonsiirtonopeus on 100 kbps (Kuzlu et al. 2018) Salausjärjestelmänä toimii PK ja siihen tarvitaan erillinen asennus. (Queralta et al. 2019) Symphony Link tarjoaa pakettikuittaukset, duplexsien tiedonsiirron sekä mukautuvan tiedonsiirtonopeuden. Lisäksi se tarjoaa sisäänrakennetun tuen toistimille yksittäisen tukiaseman kantaman parantamiseksi, luopumatta kuitenkaan kokonaiskaistanleveydestä. Protokolla tukee myös langattomia päivityksiä. (Queralta et al. 2019)

Symphony Link ja Ingenu RPMA vaativat, että kaikki saman verkon tukiasemat on synkronoitu keskenään siten, että päätelaitteet ovat ajan tasalla niiden kanssa. (Queralta et al. 2019) Symphony Linkin tapauksessa DL-suuntainen aktiivisuus vaikuttaa verkon kapasiteettiin. (Queralta et al. 2019) Symphony Link sallii yhden lähettimen kommunikoinnin monen vastaanottimen kanssa. Tämä yksinkertaistaa mm. viestien lähettämistä sekä lisää lähetysnopeutta. (Queralta et al. 2019)

Sekä tukiasemat että päätelaitteet suorittavat häiriöiden skannaamista valitukseen lähetyskanavat. Tukiasemat käyttävät Euroopassa 125 KHz:n taajuutta ja lähetinmastot (eng. transmit beacons) puolestaan 0,5 Hz:n taajuutta. Mastot on salattu verkkotunnuksella, joka täytyy konfiguroida päätelaitteissa ennen yhdistämistä. (Queralta et al. 2019)

Tukiasemat lähettävät tietoa lähetyksen aikana taajuushypintäjärjestelmään käytettyjen kanavien määrästä. Tukiasemat voidaan konfiguroida toimimaan 1, 8 tai 64 kanavalla. Toistimet sekä päätelaitteet sopeutuvat tähän järjestelyyn. Tukiasemat voivat kerätä ja lähettää tietoa myös palvelun laadusta. Tämä on hyödyllistä valittaessa, mitkä paketit priorisoidaan lähetettäväksi päätelaitteilta verkon ollessa tukkoinen. (Queralta et al. 2019)

Symphony Link-verkossa päätelaitteet voivat säästää energiaa mukauttamalla lähetystehoa ja LoRa-modulaatiota hajautuskertoimen avulla vastaanotetun signaalin tehon perusteella. (Queralta et al. 2019)

Symphony Link -protokollassa ei ole laiteluokkia. Sen sijaan kaikki laitteet toimivat samojen olosuhteiden/ehtojen pohjalta. Sekä tukiasemat että päätelaitteet suorittavat häiriönskannausta valitakseen lähetyiskanavat. Mastot on salattu verkkotunnisteella, joka täytyy konfiguroida päätelaitteille ennen niiden yhdistämistä verkkoon. Tukiasemat lähettävät tietoa lähetyksen aikana kanavahypintään käytettyjen kanavien määrästä. Ne voidaan konfiguroida 1, 8 tai 64 kanavan tukiasemiksi ja toistimet sekä päätelaitteet mukautuvat tähän. Tämä on hyödyllistä päätettäessä, mitkä paketit päätelaitteilta lähetetään, jos kanava on tukkoinen ja jollekin informaatiolle annetaan enemmän arvoa. (Queralta et al. 2019)

Symphony Linkillä on pienemmät pakettivirhemäärät, koska se hyödyntää pakettikohtaisia kuittauksia. Käyttömäärää pystyy Symphony Link -verkossa säätämään joustavasti, mikä mahdollistaa suuremman pakettimäärän lähettämisen annetussa ajassa. Se on joustava siinä, mitä tulee lähetystehon ja tiedonsiirtonopeuden säätämiseen.

3.3.8 M-Bus ja Wireless M-Bus

M-Bus on jo hieman vanhempaa langallista tiedonsiirtoteknologiaa, johon on sittemmin kehitetty langaton sovellus. Osa luvussa 2.X esitellyistä mittareista tukee myös tätä tiedonsiirtovaihtoehtoa. Alkuperäinen M-Bus-standardi oli tohtori Horst Zieglerin, Paderborinin yliopisto, ja Techemin, mittausdatan hallintaan erikoistunut yritys, yhteistyön tulos. Tämä standardi vastasi 1990-luvulla ilmenneeseen kysyntään vakiintuneesta mittauslaitteiden lukemiseen tarkoitettua tiedonsiirtostandardista. Alkuperäinen M-Bus käyttää tiedonsiirtoon yksinkertaista parikaapelia. Yksi merkittävin M-Busin etu aikanaan oli, että kaikki mittarit ja lukulaitteet on mahdollista yhdistää samaan kaapeliin. M-Bus käyttää yksinkertaistettua nelikerrosmallia. M-Busin käyttämä linkkikerros (eng. link layer) standardoitiin alun perin vuonna 1990. Ensimmäinen standardi, joka julkaistiin M-Bus-sovellukselle, oli EN 1434 vuonna 1997.

Wireless M-Bus (wM-Bus) on avoin standardi, joka on kehitetty älykkääseen mittaamiseen ja AMI-sovelluksiin. Sen on kehittänyt Open Metering Systems (OMS) group. Sen

käyttö on nopeasti leviämässä Euroopassa sähkö-, kaasu-, vesi-, ja lämpömittaukseen. wM-Bus-verkko perustuu tähtitopologialle, jossa on EN 13757-standardin mukaiset master- ja slave-laitteet. (Anani & Ouda 2022) WM-Busin määrittelee siis standardi EN13757-4:2005. wM-Bus käyttää 868 MHz:n taajuutta, mutta alhaisempikin taajuus (169 MHz) on mahdollinen ja se mahdollistaa paremman läpäisyn rakennuksissa. Sovelluksen viestit on määritelty EN 13 757-3-standardissa, kuten langalliselle M-Busille. (Hersent et al. 2012)

WM-Bus voidaan luokitella lyhyen tai keskipitkän kantaman tiedonsiirtoprotokollaksi. Se koostuu fyysisestä kerroksesta (eng. physical layer), linkkikerroksesta (data link layer), laajennetusta linkkikerroksesta (extended data link layer), lähetyskerroksesta (transport layer) ja sovelluskerroksesta (application layer). Eri valmistajien laitteita voidaan liittää yhteen wM-Bus-järjestelmään. WM-Bus tukee seuraavia tiedonsiirtotiloja:

- Stationary mode (S): Lähetykset mittareiden ja datan kerääjän (data collector) välillä. Mittari lähettää dataa muutaman kerran päivässä. S1-mallissa datan kerääjä säästää energiaa ennen datan lähettämistä. S2-mallissa lähetin vaatii kuittauksen. S1-m on sama kuin S1, mutta datan kerääjä on liikkuva vastaanotin.
- Frequent transmit mode (T): Mittauslaitteet lähettävät dataa kerääjille määritellyn ajanjakson ajan, kuten esimerkiksi muutama lähetys sekunnissa tai minuutissa. Lähetin vaatii kuittauksen datan kerääjältä.
- Frequent receive mode (R): Mittari odottaa datan kerääjän pyyntöä ennen datan lähettämistä. Yleensä mittari on virransäästötilassa ja herää edeltä määritellyin väliajoin. R2 kuuntelee herätysviestiä säännöllisin väliajoin. Herätysviestin saamisen jälkeen tiedonsiirtoon on muutama sekunti aikaa.
- Narrowband mode (N): Tätä mallia käytetään pitkän kantaman tiedonsiirtoon. Se on suunniteltu toimimaan matalan taajuuden kaistoilla (eng. low-frequency narrow band) ja pitkän matkan kantamalla simpleksisellä tai duplexisellä viestinnällä. (Anani & Ouda 2022)

Kaikki lähetystilat on suunniteltu optimoimaan akun käyttöikää siten, että mittarit ovat lepotilassa lyhyitä lähetysjaksoja lukuun ottamatta. Jotkin tiloista mahdollistavat duplexisen tiedonsiirron. T-malli tarjoaa lyhimmän lähetysajan ja pisimmän akun käyttöiän langattomille mittareille. Akkujen käyttöiän vaatimus on yleensä 10–20 vuotta. N-malli toimii 169MHz:n taajuudella. (Hersent et al. 2012)

M-Bus tarjoaa mahdollisuuden lähetetyn datan salaamiseen. Alkuperäinen määrittely käytti DES-algoritmia, kun taas uudemmat käyttävät AES 128 algoritmia LoRaWanin tavoin. Kun käytetään salausta, mittarit konfiguroidaan avaimella, joka jaetaan masterilta.

(Hersent et al. 2012) Kaistanleveys wM-Bus-verkossa on 19,2kbps (Anani et al. 2019). WM-Bus-verkon topologia voi vaihdella sovelluksen vaatiman automaation määrän mukaan. Staattisissa sovelluksissa verkko voi koostua kolmentyyppisistä solmulaitteista, joita ovat mittarit (T- ja S-tilat), toistimista (R-tila) ja keskittimistä (C-tila). (Masek et al. 2015)

3.4 Esimerkkejä älyvesimittareiden tiedonsiirtoprotokollista

Seuraavaksi vertaillaan lyhyesti esimerkin omaisesti mittarimerkkejä Sensus, Axioma, Zenner, Kamstrup, ja Verto niiden tukemien tiedonsiirtoprotokollien osalta. Sensus-mittarit tukevat Xylemin verkkosivujen mukaan ainakin M-Busin tiedonsiirtoa joko langallisesti, Ethernetin kautta tai GPRS:n kautta (Xylem). Axioma-vesimittarit, joita myy Onninen, tukevat LoRa-verkkoa (Onninen). ZENNER EDC LoRa-vesimittarit, joita Suomessa myy Korkeamäki, käyttävät langattomaan tiedonsiirtoon LoRa-tekniikkaa, joka mahdollistaa langattoman kuuluvuuden akuilla toimivalle lähettimelle. Laitteissa on sekä kiinteä radiolähetin että pitkäikäinen akku, minkä vuoksi ne soveltuvat LoRaWAN-verkossa käytettäväksi. LoRaWAN-verkon rakentamisesta ja ylläpidosta vastaa LoRa-operaattori. Korkeamäki myy myös Mbus- ja wMbus-vesimittareita. (Zenner-Korkeamäki) Kamstrup on maailman johtava älykkäiden energia- ja vesimittauksen järjestelmäratkaisujen valmistaja (Kamstrup). Kamstrupin laitteet tukevat yrityksen verkkosivujen perusteella myöhemmin tässä työssä tarkasteltavista tiedonsiirtoprotokollista LoRaWANia, Sigfoxia ja NB-IoT:tä. Näiden lisäksi Kamstrupin laitteet tukevat wM-Bus-tiedonsiirtoa. (Kamstrup) Kuten useimmat muista vertailluista mittarimerkeistä, myös Verton mittarit toimivat langattomasti LoRa-radioyhteyden avulla (Verto).

4. AINEISTO JA MENETELMÄT

Tässä luvussa esitellään tutkittava aihe ja kuvataan kirjallisuusselvityksen eteneminen. Diplomityön tilaajana on Sastamalan Vesi liikelaitokselle, joka huolehtii toiminta-alueellaan talousveden hankinnasta ja jakelusta, jätevesien poisjohtamisesta ja esipuhdistamisesta sekä hulevesien johtamisesta. Lisäksi se vastaa vesijohto- ja viemäriverkostojen rakentamisesta sekä kunnossapidosta. Päätaivoitteesta muodostettiin tutkimuskysymys, jotka on esitetty johdannossa. Tarkoitus on kartoittaa valintakriteerit, joiden perusteella eri tiedonsiirtoprotokollia vertaillaan.

4.1 Tutkimuksen eteneminen

Työ sai alkunsa älykkäiden vesimittareiden vertailuna, mutta pian kävi ilmi, ettei pelkkien vesimittareiden teknisten tietojen avulla saada haluttua lopputulosta vaan tutkimuksen täytyi painottua tarkastelemaan älykkään vesijohtoverkoston tiedonsiirron kokonaisratkaisua. Tutkimuksen päämääräksi muodostui siis selvittää, mitkä ovat merkittävimmät tekijät vesihuollon näkökulmasta tiedonsiirtoratkaisua valitessa. Tutkimus aloitettiin ongelman jäsentelyllä ja ongelmaan perehtymisellä. Tutkimusmenetelmäksi valikoitui melko aikaisessa vaiheessa kirjallisuusselvitys. Tämä menetelmä valittiin, koska aluksi oli joka tapauksessa kartutettava teoreettista tietämystä.

Toinen tutkimusmenetelmä, jota työprosessin aikana harkittiin, oli haastattelututkimus. Haastattelututkimusta ei kuitenkaan nähty tässä vaiheessa työn kannalta kuitenkaan tarkoituksenmukaiseksi, koska se olisi kuitenkin täytynyt pohjata vastaavaan kirjallisuusselvitykseen, jollainen jo tehtiin ja haastatteluissa oli tarkoitus kartoittaa ongelmia teknologian kanssa. Tämän tutkimuksen pohjaksi sopivia tutkimuksia aiheesta löytyi maailmalta kiitettävä määrä ja haastattelututkimuksesta luovuttiin, kun todettiin, että kirjallisuudesta on mahdollista saada kaikki tarpeellinen tieto eivätkä haastattelut välttämättä toisi lisäarvoa tutkimukseen. Tutkimuksen aikana käytyjen keskustelujen aikana tuli ilmi, että osa ongelmista, joita vesilaitoksilla on kohdattu, johtuvat osittain siitä, ettei niissä ole välttämättä tarkasteltu älykkään vesijohtoverkoston kokonaisuutta riittävästi.

Vastaavista aikaisemmista tutkimuksista pyrittiin hyötymään mahdollisimman paljon, jotta tiedonsiirtoverkon rakentamisesta saataisiin mahdollisimman monipuolinen kuva ja tutkimus saatiin keskitettyä oleellisiin asioihin. Lalle et al. (2019) vertaileva tutkimus eri tiedonsiirtoprotokollista toimi hyvänä lähtökohtana ja pohjana tälle tutkimukselle. Tutkimuksen eteneminen on kuvattu kuvassa 6.



Kuva 6. Tutkimuksen eteneminen

Ensimmäisenä lähtökohtana tiedonhankinnalle oli pohjatiedon kartuttaminen ja käsitteiden selvittäminen. Tässä vaiheessa pyrittiin selvittämään älykaupungin ja älyveden käsitteet sekä tiedonsiirtoprotokollien yleiset ominaisuudet. Tämä vaihe vaati jonkin verran yritystä ja erehdystä, sillä alkuvaiheessa hakusanat, joilla tietoa etsittiin, eivät olleet aina tarkoituksenmukaisia. Ensimmäiset hakusanat, joilla tietoa haettiin, olivat esimerkiksi 'main water line remote metering', 'smart water metering' ja 'remote water meter'. Jonkin ajan päästä nimittäin alkoi vaikuttaa, että työ on suunnattava enemmän tiedonsiirtoprotokollien suuntaan, jolloin edellä mainitut hakusanat osoittautuivat jokseenkin sopimattomiksi. Ne ovat olleet hyödyllisiäkin, sillä niiden myötä on ollut mahdollista kartuttaa yleiskäsitystä tutkittavasta aiheesta.

Seuraavassa vaiheessa pyrittiin muodostamaan tarkempi kuva älyvesiverkostoista, tunnetuimmista tiedonsiirtoprotokollista ja niiden ominaisuuksista. Selvitettiin siis, millaiseen

ympäristöön tiedonsiirtoverkkoa ollaan tuomassa ja millaisia erilaiset tiedonsiirtoprotokollat ovat. Lisäksi vertailtiin eri tiedonsiirtoprotokollia. Tässä vaiheessa hakusanat selvästi kehittyivät ja tarkentuivat. Seuraavia hakusanoja olivat esimerkiksi 'smart water AND 'benefits', 'smart water' AND 'challenges', 'smart water utilities', 'smart water AND "information security"', 'smart water AND "cyber security"', 'smart water AND Europe', 'smart city' ja 'smart water AND "ICT"'. Lisäksi haettiin tietoa yksittäisistä tiedonsiirtoprotokollista ja tiedonsiirtoverkon käyttöönotosta. Näitä hakusanoja ovat esimerkiksi 'LoRa-Wan' ja 'deployment AND LPWAN'. Myöhemmin kirjallisuusselvityksessä pyrittiin yksityiskohtien tarkentamiseen hakemalla tietoa esimerkiksi tietyistä teknologiasta. Lopuksi koottiin yhteen valintakriteerit ja päätöksentekoparametrit ja tarkasteltiin niitä vesihuollon toimintaympäristössä. Tiedonsiirtoprotokollan valintakriteerejä lähestyttiin vesihuoltolaitoksen näkökulmasta ja tutkittiin, mitkä tekijät vaikuttavat tiedonsiirtoprotokollan valintaan ja päätöksentekoprosessiin.

Perusteluna sille, miksi työssä tarkasteltiin juuri näitä tiedonsiirtoprotokollia, on mm. se, että tällä hetkellä LoRaWAN ja Sigfox ovat kaikkein suosituimpia LPWAN-ratkaisuja. LoRaWANin lisäksi Symphony Link on toinen laajimmin käytössä olevista LoRa-modulaatiolla toimivista tiedonsiirtoratkaisuista. Sigfox ja RPMA ovat puolestaan suosituimmat niistä ratkaisuista, jotka eivät käytä LoRa-modulaatiota. Lisäksi Weightless-teknologiat ovat hyvin tunnettuja. (Queralta et al. 2019) WM-Bus puolestaan tuli mukaan tarkasteluun vähän myöhemmin, kun osoittautui, että luvussa 2.5.1 tarkastelemistani mittareista useampi tukee tätä tiedonsiirtoprotokollaa.

Alun perin työn lopputuloksena oli tarkoitus olla päätöksentekopuu eli kuvaus siitä, mitkä ovat päätöksentekokriteerit protokollaa valitessa ja kuinka päätöksentekoprosessi etenee. Tästä kuitenkin jouduttiin luopumaan, kun huomattiin, etteivät tutkimuksen tulokset taivu päätöksentekopuun muotoon vaan tarkoituksenmukaisempi tuloksia kuvaava visuaalinen esitys on taulukko.

4.2 Sastamalan Vesi liikelaitos

Sastamalan Vesi liikelaitos huolehtii toiminta-alueellaan talousveden hankinnasta ja jakelusta, jätevesien poisjohtamisesta ja esipuhdistamisesta sekä hulevesien johtamisesta. Lisäksi se vastaa vesijohto- ja viemäriverkostojen rakentamisesta sekä kunnossapidosta. Sastamalan Vesi tekee sopimukset kiinteistöjen liittämistä yleiseen vesijohto- ja viemäriverkoston. Sastamalan Vesi liikelaitos sai nykyisen muotonsa Sastamalan kaupungin synnyttyä kuntaliitosten myötä 2009. (Sastamala.fi) Sastamalan Veden piiriin liittyneiden asukkaiden määrä on 20200 henkilöä. Tuotetun veden määrä Sastamalassa on 1329504 m³/vuosi. (vesi.fi) Vesilaitoksella oli Sastamalassa vuonna 2021

vesijohtoverkostoa yhteensä 676,1 km ja siihen oli liittynyt 6060 taloutta (Sastamalan Vesi 2021). Sastamalan kaupungin kokonaispinta-ala on 1531,74 km² (Maanmittauslaitos 2022).

Sastamalan, Huittisten ja Punkalaitumen jätevedenpuhdistamot tulivat 2010-luvulla saneerausikään, kunnat päättivät perustaa yhteisen yhtiön ja keskittää jäteveden puhdistaminen Huittisiin. Sastamalassa suljettiin neljä omaa jätevedenpuhdistamoa vaiheittain, viimeisin vuonna 2018. Sastamalassa siirryttiin vuonna 2009 pintaveden käytöstä kokonaan pohjaveden käyttöön. Kaupungissa on vähän omia pohjavesivarantoja, joten uusi vesihuolto rakennettiin yhteistyössä naapurikuntien kanssa. Runkojohdot rakennettiin Hämeenkyröstä Sastamalaan. (Sastamala.fi)

Koska Sastamalan Vesi sekä toimittaa jätevetensä Huittisten puhdistamolle että tuo talousvettä muualta, vuodot aiheuttavat kustannuksia. Tästä syystä Sastamalan veden in-tressi työn teettämiseen on ensisijaisesti vuotovesien hillitseminen. Sastamalan vesi on kiinnostunut vuotovesien hallinnasta älykkäiden vesimittareiden avulla. Laskuttamattoman talousveden määrä Sastamalassa vuonna 2021 oli 28 %, kun vastaava kaikkien laitosten keskiarvo samana vuonna oli 17 %. Vuonna 2020 vastaavat luvut olivat 30 % ja 23 %(vesi.fi). Verrattuna keskiarvoiseen laskuttamattoman veden määrään, Sastamalan vedellä tätä on suhteellisen paljon. Osa tämän ongelman ratkaisua voisi olla älykkäiden vesimittareiden käyttö ja vuotojen paikantaminen niiden avulla. Työn pohjalta on tarkoitus suorittaa pilottihankkeita Sastamalassa.

5. TIEDONSIIRTOPROTOKOLLAT ÄLYVESIVERKOSTOISSA

Tässä luvussa kuvataan tarkemmin, mitkä tekijät vaikuttavat tiedonsiirtoratkaisun valintaan ja miksi. Luvussa kuvataan, millaisia valintakriteerejä työn etenemisen myötä on tullut esille, ja mitkä ovat oleelliset kriteerit ja ominaisuudet, joiden perusteella protokollan valinta tehdään. Tässä yhdistetään vesihuoltojärjestelmä ja tiedonsiirtoprotokollat siten, että LPWAN-verkkoja vertaillaan nimenomaan vesihuollon näkökulmasta. Esi-tellään myös ehdotus päätöksentekoprosessista, joka valintakriteerien perusteella on muodostunut.

5.1 Valintaan vaikuttavat vaatimukset ja parametrit

Luvussa 3.3 esitellyt uudenlaiset tiedonsiirtoteknologiat selättävät sekä paljon energiaa kuluttavien että lyhyen kantaman teknologioiden haasteet tarjoten lisäksi erinomaisen radioläpäisyn. Lisäksi nämä matalatehoiset teknologiat ovat edullisia verrattuna matkapuhelinverkkoihin. (Lalle et al. 2021). Kuten luvussa 3.2. jo todettiin, vesihuollon ympäristö asettaa kuitenkin LPWAN-verkoille erilaisia vaatimuksia.

5.1.1 Vesihuollon vaatimukset tiedonsiirtoverkolle

Älykkääseen vesijohtoverkoston liitettävien IoT-laitteiden on oltava energiatehokkaita, sillä monissa tapauksissa ne on asennettava hankalakulkuisiin paikkoihin, kuten putkistoon maan alle. Älykkääseen vesijohtoverkoston asennettavilla laitteilla ja niiden akuilla on oltava maksimaalinen käyttöikä. (Lalle et al. 2019) Lalle et al. (2019) esittää laitteiden akkujen käyttöikäksi 15 vuotta ja sitä enemmän, kun taas Buurman et al. (2020) mukaan tavoiteltu käyttöikä akuille on 10 vuotta. Käytännössä akkujen käyttöikä riippuu siitä, kuinka paljon laitteita käytetään eli kuinka paljon niillä mitataan ja lähetetään dataa.

Jotta valtava määrä älykkään vesi-infrastruktuurin IoT-laitteita voidaan yhdistää ja palvelut integroida järjestelmään, vaaditaan tiedonsiirtoteknologialta skaalautuvuutta. Siksi älykäs vesijohtojärjestelmä vaatii parhaimman skaalattavuuden omaavat viestintäteknologiat monien laitteiden tukemiseksi. (Lalle et al. 2019) Skaalattavuuden voidaan yleisesti määrittellä olevan järjestelmän kyky säilyttää palvelun laatu kasvaessaan. Skaalautuvuudelle on esitetty useita alakategorioita. Rakenteellinen skaalautuvuus (eng. structural scalability) määrittelee, kuinka monta päätelaitetta LPWAN-verkkoon voidaan kytkeä. Tämä voidaan määrittellä joko siten, että lasketaan laitteet tukiasemaa kohden tai tukiasemat yhtä maantieteellistä aluetta kohden. Kuormituksen skaalautuvuus (eng.

load scalability) on monimutkaisempi käsite ja se viittaa liikenteen määrään, jonka jokainen laite LPWAN-verkossa pystyy kestämaan ilman ei-hyväksyttävää viivettä, laitteiden tehottomuutta tai ristiriitoja. Skaalautuvuus voidaan jakaa myös horisontaaliseen tai vertikaaliseen skaalautuvuuteen. Horisontaalinen skaalautuvuus on lähellä rakenteellista skaalattavuutta ja se määrittää kuinka monta laite- tai ohjelmistokokonaisuutta järjestelmä voi tukea. Vertikaalinen skaalautuvuus on kuormituksen skaalautuvuuden ylijoukko ja se määrittelee, kuinka paljon resursseja on käytössä jokaista verkkokomponenttia kohden. Skaalattavuuden vaatimukset vaihtelevat merkittävästi tapauskohtaisesti. (Buurman et al. 2020)

Älykäs vesijohtoverkosto koostuu useista komponenteista, joita ovat vesisäiliöt, putket, vedenpuhdistamot, jne. Jokaiseen verkoston komponenttiin on asennettava IoT-laitteita, jotta vedenjakelujärjestelmää voidaan seurata jatkuvasti. Tämä tarkoittaa sitä, että IoT-laitteiden, ylläpidon ja asennuksen hintojen on oltava mahdollisimman alhaiset, jotta järjestelmän kokonaishinta pysyy alhaisena. (Lalle et al. 2019) Järjestelmään voidaan asentaa sitä enemmän laitteita, mitä halvempia ne ovat. Huomioitavaa on, että jos LPWAN-verkon tarjoaja on julkinen, jokaista solmulaitetta kohden täytyy laitteen hankintahinnan lisäksi maksaa todennäköisesti vuosittainen tilausmaksu. Toisaalta, jos organisaatiolla on oma yksityinen LPWAN, vuosittaiset kulut aiheutuvat ylläpidosta ja tuesta. (Buurman et al. 2020)

Älykkääseen vesijohtoverkostoon asennetut IoT-laitteet sijoittuvat toisistaan useiden kilometrien päähän, jolloin vaaditaan pitkän kantaman tiedonsiirtoa, jotta data siirtyy verkostossa laitteelta toiselle tehokkaasti. (Lalle et al. 2019) Yleisesti hyväksyttävän verkon kantaman on sovittu olevan muutama kilometri taajamassa ja jopa kymmeniä kilometrejä harvaan asutulla alueella. Ero kantamissa taajamien ja harvaan asuttujen seutujen välillä johtuu siitä, että taajamiin asennettaessa signaaleihin kohdistuu häiriöitä ja ne heikkenevät. Näiden häiriöiden aiheuttajia ovat esteet, infrastruktuuri ja liikkuvat kohteet. LPWAN-verkolla tavoitekantama on taajamissa 5 km ja harvaan asutuilla alueilla 10 km. (Buurman et al. 2020) Pitkän kantaman lisäksi sensoreiden ja mittareiden keräämän datan siirtämisessä ei saa olla pitkiä viiveitä, jotta nopea päätöksenteko mahdollistuu. (Lalle et al. 2019)

Lisäksi signaalin läpäisykyky on oleellinen kriteeri, sillä monet vesimittarit voivat sijaita esimerkiksi kellareissa tai muissa signaalin kannalta epäedullisessa paikassa. Tähän voidaan tosin vaikuttaa tuomalla antenni rakennuksen ulkopuolelle. Sensoreiden ja mittareiden keräämän datan siirtämisessä ei myöskään saa olla pitkiä viiveitä, jotta nopea päätöksenteko mahdollistuu (Lalle et al. 2019).

Jotta älykkäälle vedenjakelulle voidaan taata tietty vakaus, käytettävän viestintäteknologian on oltava luotettavaa. Luotettavuuden avulla voidaan ratkaista perinteisen vedenjakelujärjestelmän ongelmia, katkoksia ja häiriöitä. Älyvesikontekstissa luotettavuus tarkoittaa järjestelmän kykyä täyttää tiettyjä vaatimuksia liittyen esimerkiksi viiveeseen ja tiedonsiirtonopeuteen. (Lalle et al. 2019) Kyberturvallisuus on yksi nousevista älykkäiden verkostojen vaatimuksista, joten myös älykkääseen vesijohtoverkoston vaaditaan protokollat, joiden turvallisuus on korkeaa luokkaa. (Lalle et al. 2019) Merkittävä tiedonsiirtoinfrastruktuurin ominaisuus on myös riittävä kaistanleveys. Koska älykäs vesijohtoverkosto vaatii useiden IoT-laitteiden yhteen kytkemisen, tiedonsiirtoinfrastruktuurilla on oltava kapasiteettia siirtää useita viestejä samanaikaisesti siten, että verkon nopeus ei kärsi. (Lalle et al. 2019)

Merkittävä tiedonsiirtoinfrastruktuurin ominaisuus on myös riittävä kaistanleveys. Koska älykäs vesijohtoverkosto vaatii useiden IoT-laitteiden yhteen kytkemisen, tiedonsiirtoinfrastruktuurilla on oltava kapasiteettia siirtää useita viestejä samanaikaisesti siten, että verkon nopeus ei kärsi. (Lalle et al. 2019)

5.1.2 Muita parametreja

Seuraavaksi käsitellään erilaisia valintoja, joita omaa LPWAN-verkkoa suunniteltaessa joudutaan tekemään. Nimittäin otettaessa käyttöön langatonta verkkoa on tehtävä useita valintoja, kuten taajuusalueeseen ja modulaatiotekniikkaan liittyen. Usein näissä valinnoissa joudutaan tekemään kompromisseja, esimerkiksi uhraamaan kaistanleveys suuremman tiedonsiirtonopeuden saavuttamiseksi tai päinvastoin. (Buurman et al. 2020)

Lisenssivapaa vai lisensoitu kaista?

Ensimmäisten valintojen joukossa on tehtävä valinta lisenssivapaiden ja lisensoitujen taajuuskaistojen välillä, koska tämä tulee vaikuttamaan muihin verkon rakentamisessa huomioitaviin asioihin. Taajuuskaistan lisensoinnin korkean hinnan takia, useat LPWAN-verkot hyödyntävät lisenssivapaita ISM-kaistoja. Näillä kaistoilla toimiminen pienentää kustannuksia, mutta kääntöpuolena niiden käyttäminen voi heikentää verkon suorituskykyä ja luotettavuutta. Lisenssivapailta kaistoilla toimivien verkkojen on oltava erityisen vastustuskykyisiä häiriölle, jota voi olla solmulaitteista aiheutuva sisäinen häiriö tai verkon ulkopuolisista lähteistä peräisin oleva häiriö. Verkon on siis käytettävä jonkinlaista häiriön hallinnan keinoa. Lisenssivapailta kaistoilla seuraa integroitavuustavoitteiden saavuttamisessa suurempia haasteita. Verkkoon voidaan valita toimintataajuus, modulaatiotekniikka ja monikäyttöjärjestelmä (eng. multiple-access scheme) siten, että lievennettäisiin lisenssivapaiden kaistojen käytöstä aiheutuvia haittapuolia mahdollisimman paljon. (Buurman et al. 2020)

Toisaalta lisensoituilla kaistoilla toimittaessa näitä haasteita ei ole ja sen voikin jo itsessään laskea yhdeksi häiriöiden hallinnan keinoksi. Lisensoituilla taajuuskaistoilla toimiminen ehkäisee ulkoisia häiriöitä parantaen samalla SINR-kerrointa (eng. Signal-to-Interference-plus Noise Ratio), turvallisuutta ja luotettavuutta. Kääntöpuolena ovat lisensoimukseen liittyvät maksut, jotka maksetaan, jotta lisensoituja kaistoja saadaan käyttää. (Buurman et al. 2020)

Säätelyelimet, kuten Euroopan telealan standardointilaitos (eng. European Telecommunications Standards Institute, ETSI), voivat myös ehkäistä häiriöitä ja ylikuormitusta asettamalla lisenssivapaille kaistoille rajoitteita. Nämä rajoitteet voivat rajata lähetysaluetta tai kuormituksen skaalautuvuutta hyödyntämällä teknologioita, joihin kuuluvat mm. lähetystehon ja käyttömäärän rajoittaminen. Rajoituksia voidaan soveltaa verkon ominaisuuksien, kuten modulaatiotekniikan tai monikäyttöjärjestelmän, mukaisesti siten, että rajoitukset voivat olla löysempiä sellaisen verkon osalta, joka on jo itsessään suunniteltu vähentämään ylikuormitusta tai häiriötä. (Buurman et al. 2020)

Euroopan telealan standardointilaitos tarjoaa lisenssivapaat kaistat 863–875.6 MHz, joilla lähetysteho on rajoitettu 27 dBm:ään 869.4–869.6 MHz:n alueella ja 14 dBm:ään kaikilla muilla. Jos Listen Before Talk (LBT) - ja Adaptive Frequency Agility (AFA) -tekniikat eivät ole käytössä, käyttömäärän rajoitukset on useimmiten määrätty pidettäväksi 0.1–1 %. Käyttömäärän rajoitukset ovat kevyemmät, 2,8 %, jos nämä tekniikat ovat käytössä. Pakolliset vähimmäiskuuntelu-aika on 160µs ja vähimmäis-TX-Off-aika on 100ms. Yksisuuntaisissa järjestelmissä lähetysaika ei saa ylittää 1 s ja kaksisuuntaisessa viestinnässä 4 s. Näiden on yhdessä pysyttävä alle 100 s/h yli 200 kHz:n taajuuskaistoilla. (Buurman et al. 2020)

Taajuuskaista

Kun on valittu lisensoitujen ja lisenssivapaiden taajuusalueiden väliltä, seuraa tarkempi taajuuskaista valinta valitulta alueelta. Toisin sanoen määritellään verkon operointitaajuus ja kaistanleveys. Valinta koostuu kahdesta elementistä, jotka ovat 1) kantoaallon taajuuden valinta ja 2) taajuusalueiden, joita verkko voi käyttää yhtäaikaisten viestien lähettämiseen, valinta. Kantoaallon taajuudella on merkittävä vaikutus LPWAN-verkon kantamaan. (Buurman et al. 2020)

Moni verkko käyttää matalampia taajuuksia saavuttaakseen suuremman kantaman. Toiset verkot puolestaan hyödyntävät korkeampia taajuuksia saavuttaakseen suuremmat tiedonsiirtonopeudet kantaman kustannuksella. Jos käytetään lisenssivapaita alueita, valittu kantoaalto vaikuttaa häiriöiden hallintaan ja integraatioon, koska muutkin verkot

voivat toimia samalla kaistalla. Alueelliset viranomaiset voivat määrätä yksittäisille heidän lisenssivapaalla alueellaan toimiville kaistoille useanlaisia käyttömäärän ja lähetystehon rajoitteita riippuen viestintään käytetystä kaistanleveydestä. Koska lähetysteho määrittää kantaman, ja käyttömäärä vaikuttaa merkittävästi kuormituksen skaalautuvuuteen valitut taajuuskaista ja kantoaalto vaikuttavat lisenssivapailla alueilla näihin molempiin parametreihin. (Buurman et al. 2020)

Modulaatiotekniikka ja käyttömetodi

Modulaatiotekniikka vaikuttaa langattoman verkon bittivirheiden määrään (eng. Bit Error Rate, BER) vaikuttaen siten sen tehokkaaseen linkkibudjettiin (eng. link budget). Linkkibudjetti määrittää etäisyyden, jolla verkossa voi realistisesti kommunikoida sen lisäksi, että se määrittää sietokyvyn signaalihäiriötä vastaan. Modulaatiotekniikka vaikuttaa myös verkon kustannuksiin ja energiankulutukseen. Ultra-Narrowband (UNB)-viestit käyttävät erittäin matalaa kaistanleveyttä, kun taas spread-spectrum-tekniikat puolestaan hyödyntävät koko kaistaa. Molempien tekniikoiden tavoite on sekä hallita häiriötä että parantaa skaalautuvuutta vastakkaisten keinojen avulla. (Buurman et al. 2020)

Kanavan käyttömetodilla puolestaan on merkittävä vaikutus verkon skaalautuvuuteen, sillä se määrittää, kuinka monta laitetta voidaan kytkeä verkkoon yhtä aikaa. Esimerkiksi LoRan käyttämä ALOHA random-access-protokolla on erittäin yksinkertainen toteuttaa, edullinen ja näiden seurauksena käytetty monissa LPWAN-verkoissa. Se on kuitenkin erittäin tehoton ja sillä on alhaisempi kuormituksen skaalautuvuus. Sen asymptoottinen kapasiteetti on vain 18 %. (Buurman et al. 2020)

Lisenssivapaille verkoille määritetyt rajoitukset voivat olla riippuvaisia myös kanavan käyttömetodista. Ne toimivat rajoittamalla kuormituksen skaalautuvuutta tai kantamaa sellaisten tekniikoiden avulla, joihin kuuluvat pakolliset rajoitukset käyttömäärälle ja lähetysteholle. Tämä luo suhteen kuormituksen skaalautuvuuden ja kantaman välille. (Buurman et al. 2020)

Yksisuuntainen vai kaksisuuntainen järjestelmä?

Yksisuuntaiset järjestelmät ovat täysin sopimattomia mille tahansa LPWAN-verkolle, jossa tarvitaan jonkinlaista toimintojen tai viestien kuittausta. Kaksisuuntaiset (dupleksiset) järjestelmät voivat vastata näihin vaatimuksiin, mutta aiheuttavat kuitenkin suuremmat kustannukset ja kuluttavat enemmän energiaa. Yksisuuntaiset (simpleksiset) järjestelmät voivat olla käyttökelpoisia, kun tarvitaan erittäin edullista ja energiatehokasta verkkoa ilman kuittauksia tai toimintoja. (Buurman et al. 2020)

Suurin osa LPWAN-verkoista hyödyntää puoli dupleksisia (eng. half-duplex, HD) yhteyksiä, koska täysin dupleksiset (FD) yhteydet vaativat usein kaksinkertaisen taajuuskaistan

ja energiamäärän toimiakseen. Jos toimitaan lisensoidulla kaistoilla, on mahdollista, että kulut kasvavat. LPWAN-verkot, jotka palvelevat kriittisiä järjestelmiä tai järjestelmiä, jotka tarvitsevat samanlaista suorituskykyä sekä UL- että DL-suuntiin tapahtuvalta viestinnältä, voivat hyötyä FD-viestinnästä. Dupleksisuus vaikuttaa sekä rakenteelliseen että kuormituksen skaalautuvuuden. (Buurman et al. 2020)

Oma vai palveluntarjoajan verkko?

Liiketoimintamalli on organisaation strategia, jolla se pyrkii hyötymään LPWAN-tekniologiasta, mahdollistaen niin sen olemassaolon jatkumisen kuin sijoitusten palkitsemisen. Tarkasteltaessa olemassa olevia LPWAN-verkkoja, voidaan havaita kaksi pääliiketoimintamallia, jotka ovat tilaajaperusteinen ja tuotantoperusteinen. Tilajaperusteisessa tilaajat maksavat kuukausittaisia maksuja ja mahdollisesti etukäteismaksuja verkon käytöstä. Maksettu summa saattaa vaikuttaa siihen, montako laitetta verkkoon voidaan yhdistää, paljonko dataa voidaan siirtää ja minkä kokoisia viestejä voidaan lähettää ja mikä näiden viestien prioriteettijärjestys on. Organisaatiot ovat vastuussa infrastruktuurin käyttöönotosta ja ylläpidosta, mutta omaavat vallan kumota tai rajoittaa käyttäjän pääsyn verkkoon. (Buurman et al. 2020)

Tuotantoperusteisessa mallissa verkko rakennetaan yksityisesti organisaation tai verkko-operaattorin toimesta. Tilajaperusteinen verkko rajoittaa rakenteellista skaalattavuutta ja kantamaa operaattorin tukiasemiin, kuitenkin, niistä seuraa kiinteät ja ennustettavat kulut. Tuotantoperusteisessa verkossa käyttäjien on mahdollista rakentaa oma verkko ja kasvattaa sen rakenteellista skaalattavuutta ja kantamaa lisäämällä tukiasemia ja toistimia. Kuitenkin on olemassa käytännön rajoitus sille, missä määrin tämä voidaan toteuttaa. Verkon käyttöönotto, ylläpito ja hallinnoiminen tuovat mukanaan kasvavat ja arvaamattomat kulut. (Buurman et al. 2020)

5.2 Protokollavaihtoehtojen vertailu

Akkujen käyttöiän suhteen on protokollien välillä haastavaa osoittaa eroavaisuuksia. Käyttöikä riippuu hyvin pitkälti siitä, kuinka paljon laitteita käytetään eli kuinka paljon niillä mitataan ja lähetetään dataa. Käyttöikä tulisi kuitenkin voida olettaa ainakin 10-15vuotta. (Lalle et al. 2019, Buurman et al. 2020) Taulukossa 1 on kuvattu vertailujen tiedonsiirtoprotokollien lupaama akkujen käyttöikä.

Taulukko 1. *Akkujen käyttöikä eri tiedonsiirtoprotokollilla*

	LoRaWAN	Sigfox	NB-IoT	Ingenu RPMA	D7A	Weightless-P	Symphony Link	wM-Bus
Akunkesto	~10vuotta	>10vuotta	8-10vuotta	10vuotta	~10vuotta	10vuotta	-	10-20vuotta

Kantaman osalta puolestaan eri tiedonsiirtoprotokollien välillä vaikuttaisi olevan hyvinkin merkittäviä eroja. LoRaWAN tarjoaa kantamaksi taajamassa 2–5 km ja haja-asutusalueella 15 km. Sigfoxin kantama taajamassa on 3–10 km ja haja-asutusalueella 20–40 km ja NB-IoT:n taajamassa 1 km ja haja-asutusalueella 10 km. Ingenu RPMA lupaa taajama 15 km:n kantaman. D7A:n ja Weightless-P:n kantama on enimmillään 2 km. Symphony Linkin taajuus on sama kuin LoRaWANilla, siis 5 km taajamassa ja 15 km haja-asutusalueella, johtuen samasta radiotekniikasta. WM-Busin kantamasta ei löytynyt muuta tietoa kuin että se on ns. lyhyen/keskipitkän kantaman protokolla. Kantama riippuu verkon olosuhteista, joten täysin varmoiksi näitä lukuja ei voida sanoa. Taulukkoon 2 on koottu tiedonsiirtoprotokollien luvatut kantamat.

Taulukko 2. *Tiedonsiirtoprotokollien kantamat*

	LoRaWAN	Sigfox	NB-IoT	Ingenu RPMA	D7A	Weightless-P	Symphony Link	wM-Bus
Kantama	taajama 2-5km, haja-asutus 15km	taajama 3-10km, haja-asutus 20-40km	taajama 1km, haja-asutus 10km	taajama 15km	1km, aliohjaimien avulla 2km	<2km	taajama 5km, haja-asutus 15km	lyhyt/keskipitkä

Vaihtoehtoisista tiedonsiirtoprotokollista lisenssivapaita ovat LoRaWAN, Sigfox, RPMA, D7A, Weightless-P ja WM-Bus. NB-IoT ja Symphony Link puolestaan ovat lisensoituja Euroopassa 868MHz:n ISM-taajuuskaistaa käyttävät LoRaWAN, Sigfox, DASH7, Weightless-P ja wM-Bus. NB-IoT käyttää LTE-kaistoja ja Ingenu RPMA puolestaan 2,4GHz ISM-kaistaa. Symphony Link käyttää samoja alle GHz:n ISM-kaistoja kuin useimmat muutkin LPWAN-tekniologiat, esimerkiksi EU:ssa 868 MHz. Tämä teknologia on kuitenkin lisensoitua. Tiukimmat käyttömäärän rajoitukset koskevat alle GHz:n lisenssivapaita kaistoja, joita ovat LoRaWAN, Sigfox, D7A, Weightless-P ja wM-Bus. Ingenu RPMA:ta koskevat löyhemmät rajoitukset sen käyttämän taajuuskaistan takia ja NB-IoT:ta ja Symphony Linkiä eivät koske rajoitukset ollenkaan niiden lisensoinnin takia. Taulukossa 3 on esitetty tarkasteltujen LPWAN-verkkojen taajuuskaistat.

Taulukko 3. *LPWAN-verkkojen taajuuskaistat*

	LoRaWAN	Sigfox	NB-IoT	Ingenu RPMA	D7A	Weightless-P	Symphony Link	wM-Bus
Taajuuskaista	EU: 868MHz ISM	EU: 868MHz ISM	LTE	2,4GHz ISM	EU: 868MHz ISM	EU: 868MHz ISM	EU: 868MHz ISM	EU: 868MHz ISM

Kaistanleveydet ovat LoRaWANilla 125kHz, Sigfoxilla 100Hz, NB-IoT:lla 200kHz, Ingenu RPMA:lla 1MHz, Weightless-P:lla 12,5kHz ja wM-Busilla 19,2 kbps. Verkkotopologia on kaikilla vaihtoehdoilla kutakuinkin samanlainen tähtimäinen. Joitain pieniä eroja löytyy, esimerkiksi se, mitä yhteyttä minkäkin laitteen välillä käytetään. Protokollista

Tiedonsiirtoprotokollista ainakin LoRaWAN, NB-IoT, Ingenu RPMA, D7A, Symphony Link ja wM-Bus tukevat toistimia. LoRaWAN, Ingenu RPMA, Weightless-P, Symphony Link ja wM-Bus tarjoavat viestien kuittaukset. Sigfoxin ja Weightless-P:n skaalautuvuus

on heikko. LoRaWANin skaalautuvuus on heikko tai keskitasoinen. Keskitasoinen skaalautuvuus on myös wM-Busilla. NB-IoT:n ja Ingenu RPMA:n skaalautuvuus on puolestaan hyvä. Taulukossa 4 on kuvattu LPWAN-verkkojen skaalautuvuudet.

Taulukko 4. *Tarkasteltujen LPWAN-verkkojen skaalautuvuus.*

	LoRaWAN	Sigfox	NB-IoT	Ingenu RPMA	D7A	Weightless-P	Symphony Link	wM-Bus
Skaalautuvuus	heikko	heikko	hyvä	hyvä	-	heikko	-	-

Suurin osa tiedonsiirtoprotokollista on ns. puolidupleksisia (LÄHDE?) LoRaWAN, Sigfox, RPMA ja WM-Bus ovat lähteiden mukaan puolidupleksisia. NB-IoT:tä on mahdollista käyttää täysin duplexisesti. Weightless-P ja Symphony Link ovat kaksisuuntaisia, mutta niistä ei löydy sen tarkempaa tietoa. Symphony Linkin tosin voimme olettaa olevan puoliduplexinen, koska samaa LoRa-radiotekniikkaa käyttävä LoRaWANkin on. Taulukossa 5 on vertailtu LPWAN-verkkoja duplexisuuden osalta.

Taulukko 5. *LPWAN-verkkojen duplexisuus*

	LoRaWAN	Sigfox	NB-IoT	Ingenu RPMA	D7A	Weightless-P	Symphony Link	wM-Bus
Datan 2-suuntaisuus	puoliduplexinen	puoliduplexinen	puoli-/täysin duplexinen	puoliduplexinen	-	kaksisuuntainen	kaksisuuntainen	puoliduplexinen

LoRaWANin modulaatiotekniikkana on Chirp Spread Spectrum (CSS), Sigfoxin Ultra-Narrow Band (UNB) Differential Binary Phase Shift Keying (DBPSK) UL-suuntaan, GFSK(DL), NB-IoT:n LTE-perustainen, Ingenu RPMA:lla RPMA-DSSS(UL), CDMA(DL), D7A:lla GFSK ja Weightless-P:llä PSK, GMSK. Sigfox ja Ingenu RPMA siis käyttävät narrowband-modulaatiota, kun taas LoRaWAN käyttää spread spectrum -modulaatiota (Queralta et al. 2019). MAC-kerros LoRaWANilla ja Sigfoxilla on Aloha, NB-IoT:lla LTE-perustainen, Ingenu RPMA:lla CDMA-tyyppinen, D7A:lla CSMA/CA ja Weightless-P:llä TDMA/FDMA. LoRaWAN, Weightless-P ja wM-Bus käyttävät AES-128 salausta. NB-IoT:n salaus on 3GPP (128-256bit), Ingenu RPMA:n 16B hash, AES 256b, DASH7 (AES-CBC) /AES-CCM ja Symphony Linkin PK. Sigfoxilla salausta ei ole sisäänrakennettu. Taulukossa 6 on vertailtu LPWAN-verkkojen modulaatiotekniikoita ja MAC-kerroksia.

Taulukko 6. *LPWAN-verkkojen modulaatiotekniikat ja MAC-kerrokset*

	LoRaWAN			Sigfox	NB-IoT	Ingenu RPMA	D7A	Weightless-P	Symphony Link	wM-Bus
	Luokka A	Luokka B	Luokka C							
Modulaatiotekniikka	Chirp Spread Spectrum (CSS)			Ultra-Narrow Band (UNB) DBPSK(UL), GFSK(DL)	LTE	RPMA-DSSS(UL), CDMA(DL)	GFSK	PSK, GMSK	-	-
MAC-kerros	Aloha	Slotted Aloha	Aloha	Aloha	LTE	CDMA-tyyppinen	CSMA/CA	TDMA/FDMA	-	-

LoRaWANin tiedonsiirtonopeus vaihtelee välillä 300 bps-50 kbps riippuen hajautuskerroimesta ja kaistanleveydestä. Sigfoxilla suurin nopeus on UL-suuntaan 100bps, ja DL-suuntaan 600bps. NB-IoT:n nopeus on 200kbps, Ingenu RPMA:lla 78kbps(UL) ja 19,5kbps(DL), D7A:lla 166,67kbps, Weightless-P:llä 100kbps ja Symphony Linkillä 100 kbps. LoRaWAN, Ingenu RPMA, DASH7, Weightless-P ja Symphony Link omaavat mukautuvan tiedonsiirtonopeuden. Suurin mahdollinen tietosisältö LoRaWANilla on 243

tavua, Sigfoxilla 12B(UL) ja 8B(DL), NB-IoT:lla 1600B, Ingenu RPMA:lla 10KB ja D7A:lla 256B.

Huomioitavaa on yksi merkittävimmistä Ingenu RPMA:n eduista LoRaan ja Sigfoxiin verrattuna, joka on sen tietoverkon kapasiteetti. Ingenun mukaan yksi heidän tukiasemansa voi käsitellä jopa 2 miljoonaa päätelaitetta. RPMA tukee jopa 1200 rinnakkaisen signaalin demodulaatiota samalla taajuudella. (Queralta et al. 2019) Yleisesti, Ingenu RPMA tarjoaa samanlaiset ominaisuudet kuin Symphony Link. Kuten Symphony Link, myös Ingenu RPMA vaatii, että kaikki verkon tukiasemat on synkronoitu, jotta päätelaitteet ovat kaikki samassa ajassa. Symphony Link ja Ingenu RPMA:n välinen yhtäläisyys on lähetyksen mukautuva hajautuskerroin, jolla voidaan pienentää energiankulutusta, ja jota voidaan muuttaa kunkin lähetyshetken kanavaolosuhteiden mukaan. Vaikka tämä voidaan tehdä myös LoRaWANilla ja Sigfoxilla, toiminnallisuus ei ole sisäänrakennettuna niiden moduuleissa. Suurimmat eroavaisuudet näiden kahden protokollan välillä ovat RPMA:n isompi kapasiteetti tukiasemaa kohden ja lähetykseen käytetty taajuuskaista. RPMA:n korkeampi taajuus tarkoittaa kuitenkin sitä, että läpäisyteho useimpien materiaalien läpi on heikompi. RPMA:n DL-kapasiteetti on paljon suurempi kuin Symphony Linkin johtuen mukautuvan hajautuskertoimen metodologiasta. (Queralta et al. 2019) Ingenu RPMA:lle on kuitenkin arvioitu kantamaksi taajamassa 15 km. (Raza et al. 2017) RPMA:lla on hyvä skaalautuvuus (Rama & Özpmar 2018).

Symphony Link tarjoaa edistyneemmän standardin LoRa-verkolle. Symphony Linkin herkkyys on käytännössä sama kuin LoRaWANilla. (Queralta et al. 2019) Kyseessä on lisensoituja taajuuskaistoja käyttävä tiedonsiirtoprotokolla, joka tarjoaa ratkaisun käyttö määrän rajoituksiin hyödyntämällä taajuushypintää ja erilaisia käytettävissä olevia taajuuksia. (Queralta et al. 2019) Symphony Linkin kapasiteetti on nelinkertainen verrattuna LoRaWaniin. (Kuzlu et al. 2018) Symphony Linkillä on pienemmät pakettivirhemäärät, koska se hyödyntää pakettikohtaisia kuittauksia. Käyttömäärää pystyy Symphony Link -verkossa säätämään joustavasti, mikä mahdollistaa suuremman pakettimäärän lähettämisen annetussa ajassa. Se on joustava siinä, mitä tulee lähetystehon ja tiedonsiirtonopeuden säätämiseen. (LÄHDE?) Symphony Linkin merkittävin ero LoRaWaniin verrattuna on se, että siinä laitteita ei ole luokiteltu erikseen, vaan kaikki laitteet toimivat samojen ehtojen alaisena. Sen herkkyys on käytännössä sama kuin LoRaWANin, samoin sen käyttämät taajuudet. Symphony Linkin edut LoRaWaniin voidaan tiivistää 1) taattuun viestiin vastaanottoon/kuittiin, 2) laiteohjelmiston päivitykseen multicasting-ominaisuudella, 3) käyttömäärän rajoittamattomuuteen, 4) sisäänrakennettuun toistimien tukemiseen, 5) mukautuvaan tiedonsiirtonopeuteen dynaamisella modulaatiolla ja energian sovittamiseen lähetysteholla ja hajautuskertoimella, 6) julkiseen avaimeen perustuvaan

salaukseen ja 7) suurempaan kapasiteettiin ja pienempään määrään yhteentörmäyksiä useamman tukiaseman ympäristöissä. Symphony Link tarjoaa kestäväen ratkaisun tiedonsiirtoon esimerkiksi teollisissa ympäristöissä. (Queralta et al. 2019) Taulukkoon 7 on koottu kaikki käsiteltävien tiedonsiirtoprotokollien tässä työssä vertailtavat ominaisuudet.

Taulukko 7. Tiedonsiirtoprotokollien ominaisuudet.

	LoRaWAN			Sigfox	NB-IoT	Ingenu RPMA	D7A	Weightless-P	Symphony Link	wM-Bus
	Luokka A	Luokka B	Luokka C							
Paristonkesto	~10vuotta			>10vuotta	8-10vuotta	10vuotta	~10vuotta	10vuotta	-	10-20vuotta
Kantama	taajama 2-5km, haja-asutus 15km			taajama 3-10km, haja-asutus 20-40km	taajama 1km, haja-asutus 10km	taajama 15km	1km, aliohjaimien avulla 2km	< 2km	taajama 5km, haja-asutus 15km	lyhyt/keskipitkä
Lisensoiu/Lisenssivapaa	Lisenssivapaa			Lisenssivapaa	Lisensoiu	Lisenssivapaa	Lisenssivapaa	Lisenssivapaa	Lisensoiu	Lisenssivapaa
Taajuuskaista	EU: 868MHz ISM			EU: 868MHz ISM	LTE	2,4GHz ISM	EU: 868MHz ISM	EU: 868MHz ISM	EU: 868MHz ISM	EU: 868MHz ISM
Kaistanleveys	125kHz			100Hz	200kHz	1MHz	-	12,5kHz	-	19,2kbps
Verkkotopologia	'star-of-stars'/tähti			tähti	tähti	tähti,puu	tähti,puu	tähti	-	tähti
Modulaatiotekniikka	Chirp Spread Spectrum (CSS)			Ultra-Narrow Band (UNB) DBPSK(UL), GFSK(DL)	LTE	RPMA-DSSS(UL), CDMA(DL)	GFSK	PSK, GMSK	-	-
Salaus	AES 128b			Ei sisäänrakennettu	3GPP (128-256bit)	16B hash, AES 256b	(AES-CBC)/AES-CCM	AES-128	PK	AES-128
MAC-kerros	Aloha	Slotted Aloha	Aloha	Aloha	LTE	CDMA-tyyppinen	CSMA/CA	TDMA/FDMA	-	-
Max. tiedonsiirtonopeus	50kbps			100bps(UL), 600bps(DL)	200kbps	78kbps(UL), 19,5kbps(DL)	166,67kbps	100kbps	100kbps	-
Mukautuva tiedonsiirtonopeus	kyllä			ei	ei	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	-
Max. tietosisältö	243B			12B(UL), 8B(DL)	1600B	10KB	256B	-	-	-
Käyttömäärän rajoitus	kyllä, 1%			kyllä, 1%	ei	löyhät rajoitukset	kyllä, 1%	kyllä	ei	kyllä, 1%
Toistimet	kyllä			-	kyllä	kyllä	kyllä	-	kyllä	kyllä
Kuittaukset	kyllä			-	-	kyllä	-	kyllä	kyllä	kyllä
Skaalautuvuus	heikko/keskitaso?			heikko	hyvä	hyvä	-	heikko	-	keskitaso
Datan 2-suuntaisuus	puolidupleksinen			puolidupleksinen	puoli-/täysin dupleksinen	puolidupleksinen	-	kaksisuuntainen	kaksisuuntainen	puolidupleksinen

Kuten taulukosta 7 voidaan nähdä, tiedonsiirtoprotokollista Ingenu RPMA ja Symphony Link ovat ominaisuuksiltaan kehittyneempiä kuin LoRaWAN ja Sigfox. Tämä johtuu siitä, että kaksi edellä mainittua protokollaa ovat tuoreempia ja ne on kehitetty ottaen huomioon LoRaWANin ja Sigfoxin rajoitukset. Merkittävimmät edut Ingenu RPMAlla ja Symphony Linkillä ovat edistyneempi viestien kuittausjärjestelmä, toistimien tuki, langattomien päivitysten lähettäminen kerralla useaan laitteeseen DL-suunnassa, korkeampi tiedonsiirtonopeus ja lähetykseen liittyvien rajoitusten eliminoiminen. (Queralta et al. 2019)

5.3 Päätöksentekoprosessi

Edeltävissä luvuissa esitettyjen seikkojen perusteella on viimein mahdollista luoda kokonaiskuva tiedonsiirtoprotokollan valintaprosessista. Prosessi alkaa siitä, että selvitetään tiedonsiirtoverkon käyttötarkoitus. Vesihuollon toimintaympäristössä riittää, että tehdään selväksi, kaivataanko verkolta reaaliaikaista mittarien lukemista tai hälytystoimintoa vai toimitaanko ilman näitä ominaisuuksia. Jos mittarien luetaan kaivataan reaaliaikaisuutta tai hälytystoimintoa, vaaditaan tiedonsiirtoverkolta hieman enemmän esimerkiksi sen UL-suuntaisen suorituskyvyn osalta kuin tapauksessa, jossa ei tarvita reaaliaikaisuutta. Jos esimerkiksi halutaan jatkuvaa mittausdataa vuotojen tai kulutuksen reaaliaikaiseen seuraamiseen, on valittava riittävän suorituskykyinen tiedonsiirtoverkko. Jos taas halutaan kerätä dataa vain noin kerran päivässä, suorituskyvyltään heikompikin verkko riittää.

Joidenkin vaatimusten osalta näiden kahden eri vaihtoehdon välillä ei ole eroa. Esimerkiksi energiatehokkuus on sellainen kriteeri, joka vaaditaan molemmissa tapauksissa. Myös laitteiden edullisuus on toivottavaa molemmissa tilanteissa. Taulukkoon 8 on koottu luvussa 5.1. käsitellyistä päätöksentekoparametreista tärkeimmät.

Taulukko 8. Päätöksentekoparametrit mukailten lähde Buurman et al. (2020)

Käyttötarkoitus	Energiehokkuus	Pitkä kantama	Vaativuudet				DL-suorituskyky	Esimerkki sopivasta LPWAN-tekniologiasta
			RS = rakenteellinen skaalautuvuus KS = kuormituksen skaalautuvuus	Alhainen hinta	Luotettavuus (läpäisykyky, häiriön hallinta)	UL-suorituskyky		
Mittarien lukeminen (ei vaadita reaaliaikaisuutta)	Korkea - Akkujen vaihtaminen olisi epäkäytännöllistä ja hintavaa	Korkea - Kohteena yleensä laajat kaupunkiympäristöt. Signaalin läpäisykyky myös oleellinen kriteeri, jotta varmistetaan, että laitteet voivat kommunikoida sisätiloista tai maan alta.	Korkea (RS) - Lähes kaikissa järjestelmän osissa on verkkoon yhdistetty mittari, mikä tarkoittaa suurta mittarimäärää. Matala (KS) - Ei tavallista tärkeämpi	Korkea - Suuren laitemäärän takia kalliit laitteet eivät sovi	Korkea - Mittarit on usein sijoitettu sisätiloihin, kuten kellareihin tai estävän materiaalin, kuten betonin taakse. Lisäksi mittareiden tiheä sijoittelu voi aiheuttaa merkittävää verkkojen välisen hallinnan tarvetta	Alhainen - Jopa vuorokauden mittainen viive on hyväksyttävää tavallisessa mittarin luennassa	Alhainen/ei ollenkaan - Jopa 15 min viive on sallittua komentoviesteille Jos komentoja ei tarvita, DL-viestintääkään ei tarvita	NB-IoT, LoRaWAN, Sigfox
Mittarien lukeminen (reaaliaikaisuus tai hälytystoiminto vaaditaan)	Ks. yläriivi	Ks. yläriivi	Korkea (RS) - Ks. yläriivi. Korkea (KS) - Viestit täytyy voida lähettää kaikkina ajakohtina ja suuri määrä reaaliaikaista tai käyttödataa täytyy lähettää	Ks. yläriivi	Ks. yläriivi	Korkea - Viive ei saa ylittää yhtä minuuttia reaaliaikaisessa mittauksessa	Vaihtelee - Ks. yläriivi	NB-IoT, Ingenu RPMA, Symphony Link

Taulukossa 8 esitetyt kriteerit ovat hyvin samankaltaiset kuin Buurman et al. (2020) esittämät kriteerit. Taulukkoon valitut kriteerit valikoituivat kuitenkin kirjallisuusselvityksen ja tutkimuksen aikana käytyjen keskustelujen pohjalta muidenkin lähteiden pohjalta. Päätöksentekokriteerit alkoivat muodostua vasta tutkimuksen loppuvaiheessa, sopivien lähteiden myötä.

Kirjallisuusselvityksen ja tutkimuksen aikana käytyjen keskustelujen myötä on käynyt selväksi, että ensin täytyy hahmottaa tiedonsiirtoverkon rakentamisprosessin kokonaiskuva, ennen kuin siirrytään yksityiskohtiin, kuten mittarien kilpailuttamiseen.

Avoimen standardin tiedonsiirtoprotokollaan on oikeus kaikilla ja kuka tahansa voi rakentaa suhteellisen helposti ja edullisesti lisenssivapailla kaistoilla toimivat LPWAN-verkon. Oman verkon rakentamisessa edellä mainitulla tavalla on kuitenkin omat haasteensa. Siitä voi ensinnäkin aiheutua ennakoimattomia käyttöönotto- ja ylläpitokuluja. Lisäksi tällainen teknologia vaatii tarpeeksi osaamista, jotta tiedonsiirtoverkko saadaan toimimaan. Tiedonsiirtoverkon ylläpitoon ja päivittämiseen liittyvää osaamista tulisi organisaatiossa olla useammalla kuin yhdellä, ja mieluiten tarkkaan dokumentoituna. Voi nimittäin käydä esimerkiksi niin, että verkon tuntevan henkilön vaihtaessa työpaikkaa tietämys häviää. Oman verkon huonona puolena verrattuna palveluntarjoajan verkkoon on se, että ongelmatilanteissa ei ole saatavilla samanlaista tukea kuin palveluntarjoajien asiakkailleen tarjoama tuki. Palveluntarjoajat puolestaan lupaavat yleensä verkon ylläpitoon tukea.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämä työ toteutettiin kirjallisuusselvityksenä, jossa saatiin selvitettyä aikaisempien tutkimusten pohjalta suosituksia tiedonsiirtoprotokollan valinnasta. Työn päätavoitteena oli selvittää, mitä tekijöitä vesihuollon näkökulmasta täytyy huomioida valittaessa älykkäiden vesimittareiden tiedonsiirtoprotokollaa. Lisäksi työssä tutkittiin sitä, millaisia asioita tulee huomioida tiedonsiirtoverkkoa rakennettaessa. Kirjallisuuden avulla muodostettiin ehdotus tiedonsiirtoverkon valintaprosessista taulukon muodossa. Johdannossa esitettyihin tutkimuskysymyksiin saatiin näin vastaus.

Tämä tutkimus kokosi aikaisemman tutkimuksen pohjalta esityksen tiedonsiirtoverkon valintaprosessista ja huomioitavista tekijöistä. Tuloksena oli valintaan vaikuttavat merkittävimmät vaatimukset ja parametrit vesihuollon vaatimuksien pohjalta. Tulokset sisälsivät myös protokollavaihtoehtojen vertailun ja päätöksentekoprosessin kuvauksen. Diplomityön tutkimuskysymyksiin, jotka esitettiin työn johdannossa, saatiin näin ollen vastaus. Tulokset auttavat kehittämään järjestelmällisempää lähestymistapaa tiedonsiirtoprotokollan valintaan. Tärkeintä tässä tutkimuksessa oli, että se tarkasteli tiedonsiirtoprotokollia vesihuollon näkökulmasta. Vesihuollon toimintaympäristö asettaa tiedonsiirrolle omat vaatimuksensa.

Yksi tärkeimmistä tutkimustuloksista oli vertailu eri tiedonsiirtoprotokollien välillä. Huomattiin, että moni protokollista käyttää lisenssivapaita alle GHz:n ISM-kaistoja. Tämä voidaan selittää sillä, että lisenssivapaiden kaistojen käyttäminen on edullisempaa kuin lisenssoitujen. Kävi kuitenkin ilmi, että lisenssivapaiden kaistojen käytöllä on myös heikkoutensa, kuten käyttömäärän rajoitukset. Tiedonsiirtoprotokollista uusimmat, kuten Ingenu RPMA ja Symphony Link, on kehitetty pitäen silmällä vanhempien protokollien heikkouksia. Nämä heikkouden on pyritty poistamaan uusista protokollista.

Tutkimuksen aikana esille nousseita valintaprosessiin vaikuttavia asioita olivat energia- tehokkuus, kantama, rakenteellinen skaalautuvuus, laitteiden edullisuus, luotettavuus ja suorituskyky niin UL- kuin DL-suuntaan. Ennen kuin verkko rakennetaan, on tarpeet vähintään edellä mainittujen tekijöiden osalta selvitettävä. Se, kuinka paljon kukin edellä mainituista tekijöistä vaikuttaa valintaan, riippuu käytännössä pitkälti siitä, miten tiheästi mittareita on tarkoitus lukea ja halutaanko järjestelmään hälytystoiminto. Jos mittareita luetaan harvemmin, esimerkiksi kerran päivässä, tiedonsiirtoverkolta ei vaadita samantyyppistä suorituskykyä kuin reaaliaikaisessa mittaamisessa. Näiden tekijöiden perusteella voidaan muodostaa kokonaiskuva prosessista, mikä on oleellista ennen kuin siirrytään

yksityiskohtiin. Tiedonsiirtoprotokollan valintaprosessi vaihtelee tapauskohtaisesti. Ei ole olemassa yhtä kaikkiin tilanteisiin sopivaa tiedonsiirtoprotokollaa.

Tiedonsiirtoprotokollaa valittaessa täytyy tehdä itse asiassa useita pienempiä valintoja, jotka vaikuttavat lopulliseen valintaan. Ensimmäisten valintojen joukossa valittava lisensivapaan ja lisensoidun kaistan välillä, koska tämä tulee vaikuttamaan muihin verkon rakentamisessa huomioon otaviin asioihin. Tätä seuraa tarkempi taajuuskaista valinta valitulta alueelta eli määritellään verkon operointitaajuus ja kaistanleveys. Modulaatiotekniikka vaikuttaa langattoman verkon bittivirheiden määrään ja mm. verkon kustannuksiin ja energiankulutukseen. Kanavan käyttömetodilla puolestaan on merkittävä vaikutus verkon skaalautuvuuteen. On myös valittava, onko tiedonsiirto yksi- vai kaksisuuntaista. Yksisuuntaiset järjestelmät ovat täysin sopimattomia mille tahansa LPWAN-verkolle, jossa tarvitaan jonkinlaista toimintojen tai viestien kuittausta. Kaksisuuntaiset järjestelmät voivat vastata näihin vaatimuksiin, mutta aiheuttavat kuitenkin suuremmat kustannukset ja kuluttavat enemmän energiaa. Tilaajaperusteisessa verkossa tilaajat maksavat kuukausittaisia maksuja ja mahdollisesti etukäteismaksuja verkon käytöstä. Palveluntarjoajat ovat vastuussa infrastruktuurin käyttöönotosta ja ylläpidosta, mutta omaavat vallan kumota tai rajoittaa käyttäjän pääsyn verkkoon. Tuotantoperusteisessa verkossa käyttäjien on mahdollista rakentaa oma verkko ja kasvattaa sen rakenteellista skaalautuvuutta ja kantamaa lisäämällä tukiasemia ja toistimia. Tässä mallissa verkon käyttöönotto, ylläpito ja hallinnoiminen tuovat kuluja.

Tämä diplomityö ei hyödytä pelkästään vesihuollon toimijoita, vaan sitä voidaan käyttää ohjenuorana muissakin LPWAN-verkkojen sovelluskohteissa. Näitä kohteita on esimerkiksi teollisuudessa tai älykaupungin eri osa-alueilla. Muita älyverkkojen sovelluksia ovat esimerkiksi älykkäät sähköverkot, joissa diplomityön tulokset voivat olla erityisen hyödyllisiä.

LÄHTEET

- Adams M. N. & Jokonya O. (2022). An investigation of smart water meter adoption factors at universities. *Procedia Computer Science*, 196, 324-331
- Aggarwal S. & Nasipuri A. (2019). Survey and performance study of emerging lpwan technologies for iot applications. In *2019 IEEE 16th International Conference on Smart Cities: Improving Quality of Life Using ICT & IoT and AI (HONET-ICT)* (pp. 069-073)
- Alghamdi A. M., Khairullah E. F. & Al Mojamed, M. M. (2022). LoRaWAN Performance Analysis for a Water Monitoring and Leakage Detection System in a Housing Complex. *Sensors*, 22(19), 7188.
- Anani W., Ouda A. & Hamou A. (2019). A survey of wireless communications for IoT echo-systems. In *2019 IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE)* (pp. 1-6)
- Anani W. & Ouda A. (2022). Wireless Meter Bus: Secure Remote Metering within the IoT Smart Grid. In *2022 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)* (pp. 1-6)
- Aravind P. S., Shah J. & Kurup D. G. (2018). Bit error rate (ber) performance analysis of dash7 protocol in rayleigh fading channel. In *2018 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)* (pp. 695-698)
- Ayoub W., Samhat A. E., Nouvel F., Mroue M. & Prévotet J. C. (2018). Internet of mobile things: Overview of lorawan, dash7, and nb-iot in lpwans standards and supported mobility. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(2), 1561-1581
- Beal C. D. & Flynn J. (2015) Toward the digital water age: Survey and case studies of Australian water utility smart-metering programs. *Utilities policy*. [Online] 3229–37
- Buurman B., Kamruzzaman J., Karmakar G. & Islam S. (2020). Low-power wide-area networks: Design goals, architecture, suitability to use cases and research challenges. *IEEE Access*, 8, 17179-17220
- Camero A. & Alba E. (2019). Smart City and information technology: A review. *cities*, 93, 84-94
- Foubert B. & Mitton N. (2020). Long-range wireless radio technologies: A survey. *Future internet*, 12(1), 13
- Gupta A. D., Pandey P., Feijóo A., Yaseen Z. M. & Bokde, N. D. (2020). Smart water technology for efficient water resource management: A review. *Energies*, 13(23), 6268
- Hersent O., Boswarthick D. & Elloumi O. (2012). *The Internet of Things: Key Applications and Protocols*, John Wiley & Sons, Incorporated.
- Ikäheimo A. & Metsävuori J. (2020). Vesihuoltolaitosten digistrategia– portaat digitalisaation hyödyntämiseen. Suomen Vesilaitosyhdistys ry. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 59.
- IWA. (2019). *Digital Water, Industry leaders chart the transformation journey*

Kamstrup. (n. d.). Kamstrup. Saatavissa (viitattu 13.12.2022): <https://www.kamstrup.com/fi-fi>

Karavaev I. S., Selivantsev V. I., Shtern Y. I. & Shtern M. Y. (2018) The development of the data transfer protocol in the intelligent control systems of the energy carrier parameters," IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2018, pp. 1305-1308, doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317336.

Karttunen E. & Tuhkanen T. (2003). Vesihuolto 1. RIL

Katko T. S. & Pietilä P. P. (2017). Vesihuolto kaupungistuvissa yhteiskunnissa. Alue ja Ympäristö, 46(1), 32–39

Keriwala N. & Patel A. (2022). Innovative Roadmap for Smart Water Cities: A Global Perspective. Materials Proceedings, 10(1), 1

Kulkarni P. & Farnham T. (2016). Smart city wireless connectivity considerations and cost analysis: Lessons learnt from smart water case studies. Ieee Access, 4, 660-672

Kuzlu M., Pipattanasomporn M. & Rahman S. (2018, September). Assessment of communication technologies supporting smart streetlighting applications. In 2018 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2) (pp. 1-7)

Lalle Y., Fourati L. C., Fourati M. & Barraca J. P. (2019). A comparative study of lo-rawan, Sigfox, and nb-iot for smart water grid. In 2019 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS) (pp. 1-6)

Lalle Y., Fourati M., Fourati L. C. & Barraca J. P. (2021). Communication technologies for Smart Water Grid applications: Overview, opportunities, and research directions, Computer Networks, Volume 190, 107940, ISSN 1389-1286

Li J., Yang X. & Sitzenfrie R. (2020). Rethinking the framework of smart water system: A review. Water, 12(2), 412

Maanmittauslaitos. (2022) Suomen pinta-ala kunnittain (PDF). Saatavissa (viitattu 4.1.2023): https://www.maanmittauslaitos.fi/sites/maanmittauslaitos.fi/files/attachments/2022/01/Vuoden_2022_pinta-alatilasto_kunnat_maakunnat.pdf

Marais J. M., Malekian R. & Abu-Mahfouz A. M. (2019). Evaluating the LoRaWAN protocol using a permanent outdoor testbed. IEEE Sensors Journal, 19(12), 4726-4733

Masek P., Zeman K., Kuder Z., Hosek J., Andreev S., Fujdiak R. & Kropfl F. (2015). Wireless M-BUS: an attractive M2M technology for 5G-grade home automation. In International Internet of things Summit (pp. 144-156). Springer, Cham.

Msamadya S., Joo J. C., Lee J. M., Choi J. S., Lee S., Lee D. J., Go H. W., Jang S. Y. & Lee D. H. (2022) Role of Water Policies in the Adoption of Smart Water Metering and the Future Market. Water, 14(5):826

Onninen. (n. d.). Saatavissa (viitattu 13.12.2022): <https://www.onninen.fi/effectio-ult-raanivesimi-effectio-lora-dn15-110mm-2-5m3-h-w1-ip68/p/CPR581?term=Axioma>

Pajavirta Oy. (n. d.) Vesimittarit. Saatavissa (viitattu 13.12.2022): <https://pajavirta.fi/Ta-lotekniikka/Vesimittarit>

Palermo S. A., Maiolo M., Brusco A. C., Turco M., Pirouz B., Greco E. & Piro P. (2022). Smart Technologies for Water Resource Management: An Overview. *Sensors*, 22(16), 6225

Queralta J. P., Gia T. N., Zou Z., Tenhunen H. & Westerlund T. (2019). Comparative study of LPWAN technologies on unlicensed bands for M2M communication in the IoT: Beyond LoRa and LoRaWAN. *Procedia Computer Science*, 155, 343-350

Rajala R. (2021). *Hukkaan valunut vesi – Tietokirja vesihuollon ikääntyvästä infrasta*. KehräMedia Oy

Rama Y. & Özpınar, M. A. (2018, October). A comparison of long-range licensed and unlicensed LPWAN technologies according to their geolocation services and commercial opportunities. In *2018 18th Mediterranean Microwave Symposium (MMS)* (pp. 398-403)

Ramos H. M., McNabola A., López-Jiménez P. A. & Pérez-Sánchez, M. (2019). Smart water management towards future water sustainable networks. *Water*, 12(1), 58

Raza U., Kulkarni P. & Sooriyabandara M. (2017). Low power wide area networks: An overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2), 855-873

RIL. (2017). *ROTI-raportti*

RIL. (2021). *ROTI-raportti*

Salminen J., Tikkanen S. & Koskiahho J. (2017). *Kohti vesiviisasta kiertotaloutta*. Suomen ympäristökeskus.

Sarkar S. (2022). NB-IoT: BLER and Throughput Analysis in Downlink Physical Shared Channel. In *2022 3rd International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)* (pp. 501-508)

Sastamalan Vesi. (2021) *Tunnusluvut 2021*.

Sastamala.fi. (n. d.). *Asuminen ja ympäristö*. Saatavissa (viitattu 9.11.2022): <https://sastamala.fi/asuminen-ja-ymakku/sastamalanvesi/>

Shpak I. & Abramenko S. (2018). *Comparative Analysis of LPWAN Network*

Twort A., Ratnayaka D. & Brandt M. (2000). *Water Supply*. 5th ed. London: Arnold/IWA Pub

Vejlgaard B., Lauridsen M., Nguyen H., Kovács I. Z., Mogensen P. & Sorensen M. (2017). Coverage and capacity analysis of Sigfox, lora, gprs, and nb-iot. In *2017 IEEE 85th vehicular technology conference (VTC Spring)* (pp. 1-5)

Verto. (n. d.) *VERTOBLUE | SÄHKÖSUUNNITTELUOHJE*. Saatavissa (viitattu 13.12.2022): https://www.verto.fi/files/d2020/November/VertoBlue_Sahkosuunniteluohje_SO081020203.011.pdf

vesi.fi. (n. d.) *Vesihuoltolaitosten tunnusluvut*. Saatavissa (viitattu 13.12.2022): <https://www.vesi.fi/vesihuoltolaitosten-tunnusluvut/raportti.php?organisaatio=1449>

Virtanen V. (2020) *Langattoman AMR-verkon etähallinta ja -luenta*.

Wang Y., Shao S., Guo S., Chai R., Qi F. & Kadoch M. (2021). An adaptive link-level recovery mechanism for electric power iot based on lorawan. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 27(1), 287–298.

Xylem. (n. d.). Sensus M-Bus System. Saatavissa (viitattu 5.1.2023): <https://www.xylem.com/fi-fi/products--services/telemetry-communications--data-transfer/adapters-converters--signal-processors/m-bus-system/?facetids=1308&facetids=1590&facetids=1591>

Zenner-Korkeamaki. (n. d.). Tuotteet. Saatavissa (viitattu 13.12.2022): <http://www.zenner-korkeamaki.com/fi/tuotteet/index.htm>